

RENATO AURÉLIO CASTRO COSTA

**DETERMINAÇÃO DE ESTOQUES ENTRE POSTOS EM LINHAS NÃO
BALANCEADAS E SUJEITAS A PARADAS NA INDÚSTRIA DE MANUFATURA**

**Dissertação apresentada como
requisito parcial à obtenção do grau de
mestre em Engenharia, Curso de Pós-
graduação em Engenharia Mecânica,
Universidade Federal do Paraná.**

Orientador: Prof. Marcelo G. Cleto

CURITIBA

2003

TERMO DE APROVAÇÃO**RENATO AURÉLIO CASTRO COSTA**

DETERMINAÇÃO DE ESTOQUES ENTRE POSTOS EM LINHAS NÃO
BALANCEADAS E SUJEITAS A PARADAS NA INDÚSTRIA DE MANUFATURA

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ricardo Mendes Júnior
Departamento de Construção Civil / UFPR

Prof. Dr. Alfredo Iarozinski Neto
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Prof. Dr. Marcelo Gechele Cleto
Departamento de Engenharia Mecânica / UFPR
Presidente

Curitiba, fevereiro de 2003

*A meus pais, Willington e Aparecida,
que sempre me incentivaram,
a minha filha Ana Catarina cuja
chegada teve que aguardar e,
principalmente, a minha esposa Marcelle,
pelo apoio constante e compreensão.*

AGRADECIMENTOS

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização e divulgação deste trabalho.

Meu especial agradecimento a empresa que colaborou como sujeito da pesquisa.

À Universidade Federal do Paraná,
pela oportunidade concedida.

Aos professores do Curso de Pós-graduação,
que contribuíram na minha formação acadêmica.

Aos colegas do PG-MEC,
pelos importantes debates em torno das questões
acadêmicas.

Agradeço a professor e orientador Marcelo Gechele Cleto, pelo acompanhamento e revisão do estudo, contribuindo com críticas construtivas para o maior aprofundamento do projeto de pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ORIGEM DO TRABALHO	2
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO	3
1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	3
1.4 METODOLOGIA DE PESQUISA	4
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2 EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO	8
2.1 PRODUÇÃO EM MASSA	8
2.2 SISTEMA DE PRODUÇÃO ENXUTA	12
2.2.1 Histórico	12
2.2.2 Princípios	16
2.2.2.1 Sistema Just-in-Time	19
2.2.2.2 Limitações do Sistema	24
2.2.2.2.1 Produção Nivelada	25
2.2.2.2.2 Redução do tempo de preparação	27
2.2.2.2.3 Arranjo-físico celular	28
2.2.2.2.4 Padronização dos trabalhos	28
2.3 A TEORIA DAS RESTRIÇÕES	31
2.3.1 Histórico	31
2.3.2. Conceitos	33
2.3.3. Processo de Decisão na Teoria das Restrições	36
2.3.4. Regras da Teoria das Restrições	37
2.3.5. Manufatura Sincronizada	39
2.3.6 Vantagens e Limitações da Teoria das Restrições	41
2.4 CONFIABILIDADE	44
2.4.1 Conceitos	44
2.4.2 Parâmetros da Confiabilidade	46
2.4.3. Disponibilidade	47
2.4.4 Manutenção	49
2.4.4 Manutenção Produtiva Total	50
2.4.5 Manutenção Centrada em Confiabilidade	55
3 MODELAGEM DE FLUXOS	56
3.1 MODELAGEM DE SISTEMAS	56
3.1.1 Tipos de Modelos	58
3.2 TEORIA DAS FILAS	60
3.2.1 Histórico	60
3.2.2 Conceitos	61
3.2.2.1 Características da Fila	62
3.2.3 Classificação de Filas	64
3.2.3.1 Modelo D/D/1/K-1	65

3.2.3.2 Modelo M/M/1	67
4 CONSTRUÇÃO DO MODELO	70
4.1 UNIVERSO DA PESQUISA	70
4.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO	72
4.2.1 Ciclo de produção dos postos de trabalho	73
4.2.2 Falhas nos equipamentos	75
4.2.3 Funcionamento em caso de problemas de qualidade.....	76
4.2.4 Funcionamento do fluxo de produção dos postos de trabalho.....	78
4.2.5 Montagem das Equações	80
4.3 EXCELL COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE.....	88
4.3.1. Construção da Planilha Eletrônica.....	89
4.4 TESTES DE FUNCIONAMENTO.....	93
5 ESTUDO DE CAMPO	100
5.1 A EMPRESA.....	100
5.1.1 Estrutura Organizacional	101
5.2 PROCESSO DA LINHA DE PRODUÇÃO EM ESTUDO.....	102
5.3. LEVANTAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA	103
5.4. CÁLCULO DA CAPACIDADE DOS PULMÕES	108
5.5 RESULTADOS	110
5.6 DISCUSSÃO	112
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	121
6.1 CONCLUSÕES	121
6.2 RECOMENDAÇÕES.....	123
GLOSSÁRIO	125
REFERÊNCIAS	126

LISTA DE SIGLAS

5S	-	Organização, Arrumação, Limpeza, Padronização e Disciplina
CCQ	-	Círculos de Controle de Qualidade
EDI	-	Troca eletrônica de documentos (<i>Electronic Data Interchange</i>)
Fifo	-	Primeiro a chegar, primeiro a sair (<i>First In First Out</i>)
JIT	-	Justo no tempo (<i>Just-in-time</i>)
Lifo	-	Último a chegar, último a sair (<i>Last In First Out</i>)
MIG	-	Metal Gas Inerte
MRP	-	Planejamento das necessidades de materiais (<i>Material Requirements Planning</i>)
MRP II	-	Planejamento dos recursos de manufatura (<i>Manufacturing Resource Planning</i>)
OPT	-	Tecnologia da Produção Otimizada (<i>Optimized Production Technology</i>)
RCM	-	Manutenção Centrada em Confiabilidade (<i>Reliability Centred Maintenance</i>)
RRC	-	Recurso com Restrição de Capacidade
SPE	-	Sistema de Produção Enxuta
STP	-	Sistema Toyota de Produção
TOC	-	Teoria das Restrições (<i>Theory of Constraints</i>)
TPC	-	Tambor-Pulmão-Corda

- TPM - Manutenção Produtiva Total (*Total Productive Maintenance*)
- TQC - Controle da Qualidade Total (*Total Quality Control*)
- TQM - Gerenciamento da Qualidade Total (*Total Quality Management*)
- TRF - Troca Rápida de Ferramentas. Técnica utilizada a fim de reduzir o tempo de preparação e ajuste das máquinas (*setup*).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – CARTÃO <i>KANBAN</i> DE (A) PRODUÇÃO E (B) MOVIMENTAÇÃO OU RETIRADA	19
FIGURA 2 – CARTÃO <i>KANBAN</i> DE FORNECEDOR OU SUBCONTRATADO.....	20
FIGURA 3 – CARTÃO <i>KANBAN</i> DE SINALIZAÇÃO (A), CARTÃO <i>KANBAN</i> DE MATERIAIS (B) E ESQUEMA DO NÍVEL DE REPOSIÇÃO E CARTÃO DE REQUISIÇÃO (C).....	21
FIGURA 4 – METODOLOGIA TAMBOR-PULMÃO-CORDA NA PRODUÇÃO SINCRONIZADA.....	39
FIGURA 5 – VARIAÇÃO DA TAXA DE FALHAS AO LONGO DO TEMPO.....	45
FIGURA 6 - DIVISÃO DOS TEMPOS DE MANUTENÇÃO	49
FIGURA 7 - PERDAS NA MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL.....	52
FIGURA 8 – CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE MODELOS I	59
FIGURA 9 – CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE MODELOS II	59
FIGURA 10 – PROCESSO DE SISTEMA DE FILAS.....	62
QUADRO 1 – SISTEMA DE EQUAÇÕES PARA OS ESTADOS NO MODELO M/M/1	68
FIGURA 11 - ESQUEMA DE CONFIGURAÇÃO MÍNIMA DE POSTOS DE TRABALHO	73
GRÁFICO 1 – HISTOGRAMA DA VARIAÇÃO DO TEMPO DE CICLO.....	74
TABELA 1 – FREQUÊNCIA RELATIVA DOS TEMPOS DE PROCESSAMENTO	74
QUADRO 2 – EVENTOS DOS SISTEMAS.....	84
QUADRO 3 – EQUILÍBRIO DOS POSTOS.....	86
GRÁFICO 2 – EVOLUÇÃO DO RESULTADO DAS EQUAÇÕES EM FUNÇÃO DA CAPACIDADE DOS PULMÕES	87
QUADRO 4 – EQUILÍBRIO DOS POSTOS PARA LINHA DE Z POSTOS	87
QUADRO 5 - TERMOS DO SOLVER	89
FIGURA 12 - ENTRADA DOS DADOS DA PLANILHA ELETRÔNICA.....	90
FIGURA 13 – PARAMETRIZAÇÃO DO SOLVER	91
FIGURA 14 – CONFIGURAÇÃO DE OPÇÕES DO SOLVER.....	92
GRÁFICO 3 – EFEITO DA REDUÇÃO DA DISPONIBILIDADE NOS PULMÕES DE UM POSTO GARGALO	94
GRÁFICO 4 – EFEITO DO AUMENTO DO TEMPO DE CICLO NOS PULMÕES DE UM POSTO GARGALO	94
GRÁFICO 5 – EFEITO DA POSIÇÃO DE UM POSTO GARGALO EM DISPONIBILIDADE NOS PULMÕES.....	95
GRÁFICO 6 – EFEITO DA POSIÇÃO DE UM POSTO GARGALO EM TEMPO DE CICLO NOS PULMÕES	96
GRÁFICO 7 – MUDANÇA DE PATAMAR PROGRESSIVO DE DISPONIBILIDADE ..	97
GRÁFICO 8 – MUDANÇA DE PATAMAR REGRESSIVO DE DISPONIBILIDADE	98
GRÁFICO 9 – MUDANÇA DE PATAMAR PROGRESSIVO DE TEMPO DE CICLO ...	99
GRÁFICO 10 – MUDANÇA DE PATAMAR REGRESSIVO DE TEMPO DE CICLO.....	99
FIGURA 15 – LINHA DE PRODUÇÃO DO ESTUDO DE CAMPO.....	102
TABELA 2 – CAPACIDADE DOS PULMÕES NA SITUAÇÃO ATUAL.....	103
TABELA 3 – TEMPO DE CICLO POR POSTO DE TRABALHO	104

TABELA 4 – NÍVEL DE QUALIDADE DOS POSTOS DE TRABALHO	104
TABELA 5 – PARADAS PARA TROCA DE FERRAMENTA DOS POSTOS	105
TABELA 6 – PARADAS PARA PREPARAÇÃO DOS POSTOS DE LINHA	106
TABELA 7 – PARADAS DEVIDO A FALHA NOS POSTOS DE LINHA	106
TABELA 8– CÁLCULO <i>MTBF</i> E <i>MTTR</i> DOS POSTOS.....	107
TABELA 9 – LIMITES DE CONFIANÇA À 99% PARA <i>MTBF</i> DOS POSTOS.....	108
FIGURA 16 – VALORES ENCONTRADOS DA CAPACIDADE DOS PULMÕES PARA O ESTUDO DE CAMPO	109
TABELA 10 – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS CUSTOS DOS PULMÕES	109
TABELA 11 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS <i>LEAD-TIMES</i> DOS PULMÕES.....	110
TABELA 12 – RESULTADOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DO MODELO.....	111
TABELA 13 – CONFIGURAÇÃO INICIAL E FINAL NA APLICAÇÃO DO MODELO.....	111

RESUMO

Este trabalho desenvolveu uma ferramenta para determinar o mínimo estoque entre postos de trabalho de uma linha de produção dedicada a um produto na indústria de manufatura. Os tempos de processamento dos postos não são balanceados, o lote de transferência na linha é unitário e seus equipamentos estão sujeito à falhas. A indústria de manufatura foi escolhida por possuir linhas de produção com tais características e peças discretas, ao contrário das indústrias de processamento contínuo. O objetivo do trabalho foi desenvolver uma ferramenta simples, de fácil utilização, construída sobre uma planilha eletrônica de um programa de computador amplamente difundido entre as empresas, sem causar perdas de produção. O tipo de pesquisa do estudo foi descritivo e o seu método, o hipotético-dedutivo. Após a criação do modelo, o mesmo foi aplicado num estudo de campo a fim de seu desempenho. Optou-se por desenvolver um modelo probabilístico, baseado na Teoria das Filas, ao contrário de se utilizar simuladores de fluxo. Este modelo utilizou o método numérico da planilha eletrônica para calcular a condição ótima. Utilizou-se sistema de filas D/D/1/K-1 e M/M/1 no modelo, além da visão de gargalos da Teoria das Restrições e respeitando os princípios de Produção Enxuta. Devido os equipamentos serem sujeitos a falhas, os princípios de Confiabilidade também foram considerados. Com base nas simplificações do sistema, foi desenvolvido o sistema de equações a ser resolvido pela planilha eletrônica. Um estudo de campo foi efetuado numa linha de produção de uma empresa do setor automotivo. Os resultados apresentaram ganhos na ordem de 30% nesta linha. Com isso, ilustrou-se as vantagens da teoria das restrições como filosofia para administração da produção em processos que possuem recursos-gargalos e a utilização da teoria das filas em modelagem de sistemas. Além disso, pode-se verificar que o modelo proposto atende ao seu objetivo e que as simplificações estão coerentes com estudos recentes. Este trabalho recomenda futuros estudos em linhas com características diferentes desta empregada, tais como, maiores lotes de transferência, linhas não dedicadas a um só produto, linhas com fluxos de produção ramificados, outras distribuições de probabilidade para tempos de processamento, entre outros. Ademais, ampliar o estudo para setores da empresa não relacionados com fluxos de produção mas que apresentem sistema de filas em seu funcionamento.

ABSTRACT

This work has developed a tool that can be able to determine minimum supply storage on working stations of a production line. Such is aimed to a manufacturer final outlet. The working stations processing time shouldn't be balanced, the production line continuing is single and their equipments are due to eventual breakdowns. The manufacturing industry system has been chosen as it bears production line features along with discreet parts, apart from those continuing processing format industries. The main purpose of this work is developing an easy-to-handle and electronic chart-built-in tool out of a computer software application, which is familiar among companies to determine this minimum work-in-process not causing any output waste. The supply storage reduction is one of the best ways for boosting companies' competition at the currently globalized market. The type of research studies has been a descriptively one and its approach hypothetical-deductive as well. After layout conceived, the same has been applied to a case study, so as to ensure its effectiveness. As it was necessary conceiving a simpler tool, a stochastic numeric methodology has been taken, not applying process simulators, instead – such require higher investments as well as higher programming skills. This model is logic itself, as it requires electronic chart numeric approach for calculating the best condition. Also stochastic, as it is based on the Queuing Theory. D/D/1/K-1 and M/M/1 queuing systems have been used to the model, besides the Theory of Constraints considering the Lean Production Principles, as well. Due to eventual equipment breakdowns, the Reliability Principles have been considered in addition. After extensive research (either on national basis or international one), the system simplifications applied to the model have been shown, developing an equation system to be solved by the chart. Right afterwards, the data input from an automobile company's production line were considered. Once defined the work-in-process for such production line, the setup procedures are worked out for not so long. This production line has performed earnings of as much as 30% high. Therefore, the advantages of the Theory of Constraints were regarded as the main philosophy for production management towards bottleneck processes, leading to the queuing theory effectiveness on systems modeling. Besides, one can realize that the proposed model meets its main purpose and that the simplifications made are coherently with recent studies performed. It is advised further studies on production lines holding different features, such as, higher battles, considering mix production not-for-a-product-only production line, branch-split production line flow, other probable distribution for data processing time, among others. Finally, furthering studies on production line stream of non related companies' divisions, though performing queuing system on its own.

1 INTRODUÇÃO

Desde os tempos de Adam Smith e Frederic Taylor que se busca uma forma de administrar a produção com maior eficiência. Porém, foi através de Ford que surgiram soluções para adequar o sistema produtivo às mais variadas condições sócio-econômicas. A primeira mudança ocorrida na produção foi a passagem do tipo artesanal para a linha de produção, através do estudo de tempos e da intercambiabilidade dos componentes que eram montados, eliminando os ajustes individuais que ocorriam para cada automóvel fabricado (WOMACK, JONES, ROOS, 1992, p. 15). Nascia então, a produção seriada, em massa. Entretanto, este sistema requeria um capital volumoso a fim de manter, dentre outras coisas, altos níveis de estoque de peças em processo. Como a aplicação do capital pela empresa pode ser determinante para sua competitividade, novamente desenvolveu-se um sistema capaz de produzir em série, porém em níveis menores de estoque: o Sistema de Produção Enxuta (SPE).

A implantação do SPE não demandava tão somente um novo arranjo físico e um sistema logístico dinâmico, capaz de gerir e abastecer na borda da linha diversas referências de peças, mas também uma mudança cultural em todos os envolvidos no processo de fabricação. A qualidade passa de um objetivo de desempenho da empresa para uma condição de sucesso de implantação do programa e da própria sobrevivência da organização.

No Brasil, verifica-se um processo de modernização dos meios de produção e comercialização para adequar as empresas às inovações técnicas e organizacionais ocorridas nos últimos anos, bem como o desenvolvimento de uma base tecnológica que vise a redução de custos e a melhoria da qualidade, destacando-se a organização industrial que passou a ser mais flexível para atender as demandas variadas e as flutuações de mercado.

Dentro deste contexto, as empresas brasileiras vêm adotando formas cautelosas de redução de estoques para se adaptarem a tal dinâmica. Todavia, quando esta redução não é bem estruturada, pode incorrer em rupturas de estoque

de matéria-prima, produtos em processo e, conseqüentemente, falta de produtos acabados para o consumidor.

1.1 ORIGEM DO TRABALHO

Inicialmente, este trabalho nasceu da proposta de uma empresa do setor automotivo do Estado do Paraná de estudar um sistema capaz de adaptar a sua linha de produção à mudança do *mix* de fabricação que ocorria devido à ruptura no seu estoque das peças de fornecedores. Era necessário alterar a quantidade a ser produzida quase semanalmente. Entretanto, tal proposta foi descartada visto que houve uma estabilização do mercado e, por conseguinte, dos níveis de estoque interno. Acabaram as rupturas e as alterações do *mix*. Este passou a ter configurações definitivas, não se alterando durante períodos de no mínimo três meses.

Assim, uma nova proposta foi oferecida: estudar os níveis de estoque interprocesso, baseada na ótica dos gargalos, como a Teoria das Restrições (GOLDRATT, COX, 1986) e também na distribuição de probabilidades associadas.

Tal necessidade apareceu uma vez que a empresa, mesmo com a demanda estabilizada e os níveis de estoque de peças de fornecedores assegurados, apresentava dificuldades de atender a produção diária. Isto ocorria devido à confiabilidade dos meios de produção. Além disso, havia uma forte desconfiança de falta de sincronismo dos postos de trabalho na linha de produção. Esta, que movimenta os produtos através de lote unitário, tem seus postos balanceados a um tempo de ciclo objetivo, a fim de evitar este tipo de inconveniência.

Normalmente, simuladores de fluxo fornecem o resultado esperado de configurações dadas pelo projetista, já com as entradas do arranjo físico da linha, tempo de ciclo, da posição e do nível de estoque, dados de confiabilidade e manutenibilidade de cada posto de trabalho. Este estudo visa determinar o estoque entre processos justo necessário, baseado no volume requerido e mantidos os níveis de confiabilidade.

A importância de se trabalhar com o setor automotivo se deu pelo fato desta indústria normalmente ser a pioneira nas inovações organizacionais, bem como por ser também o setor onde existe uma rica bibliografia referente ao tema em questão. Além disso, os dados necessários para pesquisa são informatizados, o que facilita a coleta para posterior análise.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

SLACK et al. (1999, p. 282) classifica os sistemas de estoque segundo a posição do mesmo. Pode ser de estágio simples, quando possui só o estoque de bens para gerenciar, de duplo estágio, quando possui pontos de distribuição com os mesmos bens em estoque e multi-estágio, quando possui estoque de matérias-primas, produtos acabados e material em processo. Dentro de uma indústria de manufatura, trabalha-se principalmente na terceira condição, ou seja, multi-estágio. O estudo está centrado exatamente no dimensionamento do estoque de material em processo.

O objetivo do estudo foi assim definido: construir um modelo analítico simples, para calcular o mínimo estoque de material em processo necessário a fim de garantir o volume diário de produção, numa linha com lote unitário, havendo postos com operações de manufatura, não balanceados, e meios produtivos sujeitos à paradas. Além disso, foi verificada a aplicabilidade da ferramenta através de um estudo de campo.

1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

O trabalho apresenta diversas limitações quanto a abrangência do campo de conhecimento abordado.

A primeira limitação é quanto aos tipos de empresa – indústria de processamento contínuo de materiais (química, têxtil, petroquímica, siderúrgica, etc.)

e indústrias de fabricação de peças/produto discretos (mecânica e metalurgia). Esta dissertação abrange somente o segundo tipo de indústrias.

A segunda limitação é quanto ao tipo de processo de fabricação. Esta dissertação aborda somente operações em linha de produção, com fluxo contínuo através de lote de transferência unitário. Logo, não sendo aplicável para operações com produção em lotes maiores que um, tais como estampagem, tratamento superficial, entre outros. Além disso, a linha de produção é do tipo dedicada a somente um produto, ou seja, não são considerados “*mix*” de produtos.

Uma outra limitação diz respeito à obtenção dos insumos necessários à produção. Considera-se que tanto os materiais diretos estão disponíveis para fabricação (almoxarifado) assim como os recursos água, energia, ar comprimido, etc.. A falta dos mesmos é uma contingência não contemplada no modelo.

1.4 METODOLOGIA DE PESQUISA

Segundo FACHIN (1993, p. 23), “o conhecimento científico se caracteriza pela presença do acolhimento metódico e sistemático dos fatos da realidade sensível”. É através de procedimentos metodológicos, tais como classificação, comparação, análise e síntese, da aplicação de métodos, que o pesquisador extrai princípios e leis que estruturam um conhecimento rigorosamente válido e universal.

O método científico conduz a uma reflexão crítica, sendo constituído de diversas partes. As principais seriam a postulação de um modelo fundamentado nas observações ou medidas experimentais existentes, a verificação dos prognósticos deste modelo com respeito às observações ou medições ulteriores e ajustagem ou substituição do modelo conforme as exigências de novas observações (FACHIN, 1993, p. 37). Assim sendo, a última parte reconduz a primeira, tornando a ciência um processo de evolução contínua.

LAKATOS e MARCONI (1992, p. 106) afirmam que há uma distinção entre o método e métodos, por estarem em diferentes níveis de inspiração filosófica, de abstração, de finalidade explicativa, de ação nas etapas concretas de investigação e

de momento em que se situam. Por isso, há o método de aplicação de modo generalizado e métodos de aplicação particular. Para o primeiro, engloba quatro tipos: indutivo, dedutivo, hipotético-dedutivo e o dialético. LAKATOS e MARCONI (1992, p. 106) apresentam os seguintes métodos de aplicação particular, ditos métodos de procedimento: histórico, comparativo, estudo de caso, estatístico, tipológico, funcionalista, estruturalista e etnográfico.

Neste trabalho é utilizado o método hipotético-dedutivo. Este método se inicia pela percepção de uma lacuna nos conhecimentos acerca da qual formula hipóteses e, pelo processo de inferência dedutiva, testa a predição da ocorrência de fenômenos abrangidos pela hipótese (LAKATOS, MARCONI, 1992, p.106). O método de procedimento utilizado é um estudo de caso. O direcionamento deste método é dado na obtenção de descrição e compreensão completa das relações dos fatores em cada caso (FACHIN, 1993, p. 48). Inicialmente, as hipóteses com generalizações estatísticas são desenvolvidas para criar o modelo analítico baseado num sistema de equações. Estas hipóteses serão as próprias simplificações do modelo.

Após a fundamentação teórica, o modelo é aplicado num estudo de campo (MOREIRA, 2001, p. 2-5; CERVO, BERVIAN, 1981, p. 40) de uma empresa do setor automotivo de Estado do Paraná, visando uma redução dos custos de estocagem e do *lead-time* numa linha de produção dedicada. O tipo de pesquisa de campo é Quantitativo-descritivo a fim de analisar a hipótese (1991, p. 187).

Uma vez que funcionamento da linha de produção onde este estudo está limitado já era conhecido, não se fez necessário um levantamento exaustivo de dados prévio da linha. Apenas é realizado um teste de Shapiro-Wilk para normalidade com 5% de significância (SHAPIRO, WILK, 1965, p. 591-611) sobre os tempos de processamento para fins de análise, por ser mais preciso que o teste de Kolmogorov-Smirnov (CHAKRAVARTI, LAHA, ROY, 1967, p.392-394).

Antes do estudo de campo, uma avaliação qualitativa do modelo é realizada. Para isso, algumas situações são simuladas a fim de verificar o resultado numa hipotética linha de produção. Estas simulações isolaram a influência ora do tempo

de ciclo, ora da confiabilidade dos equipamentos. Para uma melhor visualização, utiliza-se gráficos em terceira dimensão para ilustrar os resultados.

Para aplicação do modelo proposto, são levantados os dados de entrada do mesmo junto à supervisão da produção da linha e são apresentados em tabelas. Estes dados já são coletados diariamente na própria empresa. Utiliza-se um nível de confiança de 99% no teste qui-quadrado para confirmar a variável do tempo médio entre falhas e o estudo é realizado num período de tempo que atenda este nível. Além disso, foram realizadas 50 medições dos tempos de processamento em todos os postos da linha para aumentar a confiabilidade do modelo.

Durante a aplicação do modelo, é utilizada a Observação assistemática (LAKATOS, MARCONI, 1991, p. 192) para acompanhar o funcionamento da linha e permitir uma melhor compreensão dos resultados obtidos.

Após a aplicação do modelo, a situação atual e a situação proposta pelo modelo são confrontadas no intuito de efetuar uma análise quantitativa dos dados, utilizando-se para isso tabelas comparativas para expressar os ganhos obtidos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A parte teórica foi desenvolvida a partir da pesquisa bibliográfica nacional e internacional e foi dividida em dois capítulos. Primeiramente, no Capítulo 2 é apresentada a evolução dos sistemas de produção e conceitos da Teoria das Restrições e Confiabilidade, onde os seus princípios serviram para delimitar o modelo. Em seguida, no Capítulo 3, é apresentado o histórico e a discussão teórica sobre Modelos, Sistemas e a Teoria das Filas. Dois tipos de sistema de filas foram utilizados na construção do modelo probabilístico proposto, visto que há uma entrada aleatória.

No Capítulo 4, os limites de utilização do modelo proposto são definidos com as simplificações adotadas e o sistema de equações do modelo analítico é apresentado. Com as equações, é construída a planilha eletrônica onde é utilizado o

método numérico do software da planilha eletrônica para o cálculo dos pulmões. Neste capítulo, algumas simulações de dados de linha são apresentadas a fim de verificar a coerência do modelo proposto com os conceitos adotados.

No Capítulo 5, o estudo de campo é na empresa que “abriu a sua porta” para a pesquisa acadêmica onde o pesquisador teve acesso aos dados a fim de comprovar a eficácia do modelo. Inicialmente, foram levantados os dados que serviram como entrada do modelo, como a identificação na linha de produção dos postos que apresentavam os equipamentos com menor índice de confiabilidade, tempos de ciclo, entre outros. Terminada esta etapa de coleta, foi calculado a capacidade dos pulmões, aplicado o modelo e discutidos seus resultados.

Finalmente, o Capítulo 6 contém um sumário das conclusões deste trabalho e recomendações de temas para futuras pesquisas são apresentadas.

2 EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO

O estudo da evolução dos sistemas de produção está diretamente ligado a história da indústria automobilística, visto que a mesma alterou a forma como os bens eram produzidos por duas vezes no século passado. A primeira, na mudança da produção artesanal para a produção em massa, “quando houve a separação do trabalhador dos meios de produção” (WOOD, 1992, p. 6-18) e, a segunda, da produção em massa para produção enxuta. Estas mudanças ofereceram uma considerável vantagem competitiva à indústria dos EUA e Japão frente aos outros países capitalistas. Segundo WOMACK, JONES e ROOS (1992), teria sido este o motivo pelo qual estes dois países terem alcançado uma melhor condição econômica que os outros.

2.1 PRODUÇÃO EM MASSA

Em 1863 nascia em Michigan - EUA, Henry Ford, que se diplomou em Engenharia Mecânica com 30 anos e construiu o seu primeiro carro três anos após a sua formatura. Sua intenção era tornar o automóvel um meio de transporte barato, útil e prático. Com o sucesso do seu automóvel, fundou em 1903 a Ford Motor Company.

WOMACK, JONES e ROOS (1992, p. 14) afirmam que Ford foi o maior responsável pela adoção da padronização e do uso de peças intercambiáveis, bem como a técnica da linha de montagem na sua fábrica, apesar de não ter sido o primeiro a empregar estes conceitos. Essas inovações trouxeram um aumento de produtividade, mas em contrapartida geraram altas taxas de rotatividade em sua fábrica, principalmente causadas pelas tarefas tediosas e repetitivas da linha de montagem. Para enfrentar essa dificuldade, Ford aumentou o salário diário, de US\$ 2,50 para US\$ 5,00 que resultou numa maior estabilidade em sua força de trabalho e numa redução substancial dos custos operacionais. Esses fatores, junto com o

aumento de produção devido a novas tecnologias, dobrou os lucros da companhia em dois anos (1914-1916).

Ainda segundo os autores, o fordismo foi uma grande mudança na forma de produção industrial. Os conceitos de Taylor de fragmentação das tarefas e afastamento dos que concebiam a atividade daqueles que a executavam serviram de base para Ford, que os dinamizou através da criação da linha de montagem para a produção de automóveis. Além disso, implantou a esteira rolante no chão-de-fábrica para ditar o ritmo de trabalho dos operários. Essa idéia exigiu um planejamento, uma padronização e um controle de qualidade rigorosos dos materiais e peças intercambiáveis, bem como tarefas bem determinadas.

As mudanças de Ford não se restringiram a uma aliança do taylorismo com a cadeia móvel de produção em série. Ele racionalizou o fluxo de trabalho, abolindo a preparação da produção e padronizando as peças. Ao mesmo tempo, balanceou a produção a partir de cada posto de trabalho isolado. Com essas inovações, o tempo de montagem total do veículo diminuiu de 12 horas para aproximadamente 1,5 hora, dividida em 45 operações extremamente simplificadas.

Conforme WOOD (1992, p. 8), como resultado da especialização em tarefas, ocorreu uma perda das habilidades genéricas manuais que passou a atingir também os demais níveis hierárquicos. Além dessa desqualificação, nota-se uma grande intensificação do trabalho, voltada para uma produção em grande escala. Com a padronização das peças, permitia-se a troca de homens e máquinas e minimizava-se a coordenação e o controle. O tempo de preparação (*setup*) das máquinas foi reduzido. O sistema de controle era altamente burocratizado, com uma grande verticalização da empresa.

Ford mudou a visão das pessoas sobre o carro, popularizou-o, dando condições de seus funcionários possuírem um (o que aumentou o seu mercado). Ford também interferiu profundamente na vida social de seus empregados, impondo-lhes regras que se estendiam à família, coloca FLEURY e VARGAS (1988, p. 17-37).

Ford foi o primeiro empresário a ter preocupação com os estoques. Seu relacionamento com os revendedores e usuários dos automóveis era o mais

precário possível, mantinha-os isolados e os obrigava a adquirir os automóveis do estoque antecipadamente, pensando em regular os estoques da fábrica. Este fator acabaria por caracterizar este tipo de produção: altos níveis de inventário.

De 1908 até 1927, quando a fabricação do Modelo T foi interrompida, foram vendidas 15 milhões de unidades. Por não possuir velocidade para a introdução anual de novos produtos, a empresa começou a perder parcela de mercado para seus concorrentes.

Neste momento surgia Alfred Sloan na General Motors que complementaria a Produção em Massa. Conforme WOMACK, JONES e ROOS (1992, p. 28), Sloan elaborou a organização e o sistema administrativo necessários para efetivamente administrar o sistema total das fábricas, além das operações de engenharia e dos sistemas de marketing exigidos pela produção em massa.

O sistema de Produção em Massa retrata a visão da organização como máquina, ou seja, a organização mecânica. Isto significa fixar metas e estabelecer maneiras de alcançá-las, organizando tudo de forma racional e objetivo. Segundo WOOD (1992, p. 6-18), este gerenciamento científico quando surgiu, foi visto como solução para todos os problemas. E, ainda hoje, muitas indústrias buscam na administração científica respostas para os seus problemas. Entretanto, isto requer condições ambientais estáveis, produtos com poucas mudanças ao longo do tempo e previsibilidade do fator humano.

Com o acirramento da concorrência e o desenvolvimento tecnológico, mais pronunciado nos anos 70 (KOVACS, FERREIRA, SANTOS, 1994), o modelo taylorista/fordista precisou evoluir para se tornar mais flexível. Com isso, houveram transformações do modelo inicial. Segundo KOVACS, FERREIRA e SANTOS (1994), não há uma única tendência para a expansão de um novo modelo dominante de produção. Haveria uma diversidade de situações caracterizáveis pela coexistência de diversos modelos. Nos países industrialmente mais avançados, o modelo de produção em Massa tende a dar lugar a novos modelos centrados na resposta adaptativa do aparelho produtivo às mudanças de mercado. Contudo, o modelo de produção em Massa continuaria ser importante, nomeadamente nos países menos industrializados detentores de mão-de-obra abundante e barata,

permitindo a modernização da sua economia. Esta observação é ratificada por GRAÇA (2000) o qual afirma que se as tecnologias viajam, com elas também o software organizacional do taylorismo, mais ou menos requeentado ou já adaptado aos tempos pós-modernos. A palavra de ordem “*Uma tarefa, um posto de trabalho, um homem!*”, permanece.

Para estes autores, haveria um modelo neotaylorista/neofordista, onde seria desenvolvida uma flexibilidade da mão-de-obra, com enriquecimento das tarefas, a fim de se adaptar a flexibilidade técnica, ou seja, dos equipamentos e instalações. Porém, a concepção e o controle permaneceriam separados dos trabalhadores, sendo que a tecnologia da informação seria utilizada para reforçar este controle e regulação. Este modelo é exemplificado por CARRION (2002, p. 554-582) na fábrica da cidade de Cami, criada em 1989 na fronteira do Canadá com EUA. A política de recursos humanos da empresa privilegia mais as habilidades que foram úteis à valorização do capital do que aquelas necessárias para fazer frente aos desafios postos pelo mercado.

Outro modelo citado por KOVACS, FERREIRA e SANTOS (1994) seria o modelo pós-taylorista/pós-fordista o qual teria uma ruptura com Ford e Taylor. A polivalência também seria desenvolvida, porém a tecnologia da informação em conjunto com as competências de comunicação e regulação do próprio trabalhador constituiriam a base deste modelo.

Na sua contribuição à edição brasileira do estudo de WOMACK, JONES e ROOS (1992), José Roberto Ferro colocou que, no Brasil, o sistema de produção em massa ainda seria o predominante. Persistiria um volume de estoques elevado, a necessidade de muito retrabalho ao final da linha, exatamente pela dificuldade de produzir com qualidade na primeira vez. Entretanto, na sua segunda contribuição a obra de WOMACK e JONES (1998) também para edição brasileira, José Roberto Ferro ressalta que seria cada vez mais freqüente uma nova mentalidade na organização dos sistemas de produção, com uma maior orientação para o pensamento japonês de eliminação de desperdícios e perdas. Os casos estudados por ele eram todos do setor automotivo. Entretanto, as constantes crises deste setor onde pátios ficam superlotados indicam que este movimento ainda estaria restrito a algumas montadoras.

Segundo estudo realizado por GITAHY, RABELO e LEITE (1993), fatores como a instabilidade econômica do país, a retração do mercado interno e à intensificação da concorrência internacional, tem induzido as empresas a se reestruturarem, mediante a introdução de um conjunto de inovações de produto e de processo, e de relações entre clientes e fornecedores, inspiradas no modelo japonês, principalmente. Portanto, o pensamento enxuto, kanban e a “produção flexível” fazem parte da linguagem comum dos profissionais do setor.

Pode-se concluir que, no cenário nacional assim como no internacional, o desperdício do sistema de produção fordista-taylorista e o operador especialista estão sendo eliminados. Este último devido a necessidade de flexibilizar o sistema produtivo face a concorrência. Contudo, ainda persiste o controle sobre a mão-de-obra em algumas organizações.

2.2 SISTEMA DE PRODUÇÃO ENXUTA

2.2.1 Histórico

Após a II Guerra Mundial, o Japão, sob controle dos Estados Unidos (EUA), foi obrigado a se adaptar às práticas ocidentais. As leis trabalhistas foram modificadas, sendo estabelecido um contrato social entre capital e trabalho que permitiu a formação de um novo relacionamento industrial e a legalização dos sindicatos (WOMACK, JONES, ROOS, 1992).

Com uma concorrência internacional forte e a economia abalada por causa da II Guerra Mundial, o governo japonês, mais precisamente o Ministério da Indústria e Comércio Internacional, protegeu o mercado automobilístico, proibindo investimentos externos no setor, enquanto a indústria nacional não estivesse pronta para enfrentar a concorrência internacional. Esse ato foi extremamente importante para a expansão das empresas japonesas no pós-guerra.

Os artesãos japoneses, ao contrário dos EUA, se mostraram muito resistentes à fragmentação das tarefas quando houve a explosão da produção em

massa, e, devido a isso, a desqualificação e a especialização atingiram níveis baixos no Japão. Estes trabalhadores, no período pós-guerra, foram aceitos nas indústrias como operários, até porque não haviam operários imigrantes nessa época. A mão-de-obra era abundante e barata nos grandes centros e os trabalhadores eram, em sua maioria trabalhadores rurais, que abandonaram a agricultura para trabalhar nas fábricas. Em 1949, a Toyota atravessava difícil situação financeira e precisou demitir mais de mil empregados para conseguir sobreviver. Esse fato acarretou a renúncia de Eiji Kiichiro, Presidente da Toyota na ocasião.

Em 1950, Eiji Toyoda, Presidente da Toyota, e Taiichi Ohno, engenheiro de produção da Toyota, após uma visita a fábrica da Ford em Detroit, constataram que a produção da fábrica da Toyota poderia ser modificada (WOMACK, JONES, ROOS, 1992, p. 40). O sistema americano de produção foi adaptado às condições japonesas. A produção massificada não era uma realidade japonesa, o mercado estava massacrado, havia poucos compradores de carro. A produção não podia se apoiar nas economias de escala, pois os estoques seriam altos, como também os desperdícios. Havia o limitante do capital de giro, que era escasso e ainda a problemática do relevo montanhoso que dificulta o transporte e a instalação de fábricas gigantes em terrenos planificados.

Este novo sistema de produção, conhecido na versão americanizada como produção enxuta ou *lean production* (WOMACK, JONES, ROOS, 1992, p. 40), ficou também conhecido como Sistema Toyota de Produção (STP) ou Toyotismo, por ter sido desenvolvido na montadora Toyota. O trabalho de OHNO (1997) permitiu o seu desenvolvimento. O sistema é dito enxuto quando comparado a Produção em Massa por ser menor em tudo: menor quantidade de espaço, menor investimento em ferramentas, menor espaço de tempo para desenvolver um novo projeto e menor esforço humano na fábrica (WOMACK, JONES, ROOS, 1992). Segundo SHINGO (1996), o STP surgiu da necessidade de atender um mercado de baixo crescimento econômico, onde os compradores decidiam o mercado, fixando o preço do produto. Portanto, a fim de aumentar o lucro, a única possibilidade é a redução dos custos inerentes da produção, sobretudo aqueles que não agregam valor ao produto.

Esse modelo obteve muitos ganhos de produtividade, pois renovou os instrumentos e métodos de produção com base na racionalização do trabalho. A grande diferença entre esse modelo e o fordismo no que tange o trabalho operário é o grau de responsabilidade e controle individual dado aos operários. A participação dos empregados era fundamental, e eles foram treinados e cobrados a fabricar e inspecionar os carros. Por estes fatores, GRAÇA (2000) o denominou de “taylorismo democrático”.

Os sindicatos negociaram essa maior flexibilidade dos trabalhadores, e em troca eles adquiriram emprego vitalício e salário por senioridade. Os benefícios concedidos aos trabalhadores não eram vantagem só para a classe operária. A empresa investia em treinamento dos seus funcionários para torná-los polivalentes, e estes ingressavam na Toyota geralmente entre 18 e 22 anos e iriam deixá-la quando se aposentassem. A empresa perderia muito se, por ventura, eles saíssem antes de contribuir com seus conhecimentos adquiridos, pois o investimento estaria perdido. Na Toyota, a pessoa era contratada para trabalhar para a empresa e não para um determinado cargo.

Os operários passaram a se organizar em equipes de trabalho com um líder de equipe no lugar de um supervisor. Cada equipe era responsável por um determinado conjunto de tarefas e se auto-organizavam para executá-las. O líder substituíam um funcionário faltante, mantendo o ritmo da produção da equipe. Apesar da organização em grupos, o controle e a premiação eram feitas individualmente. Segundo SPEAR e BOWEN (1999, p. 101), o número de operários por equipe era determinado em função dos tipos de problemas que ocorreriam, o nível de assistência que os integrantes necessitariam e, habilidades e capacidades do *Team Leader*.

Segundo WOMACK, JONES e ROOS (1992, p. 47), depois das equipes estarem funcionando bem, Ohno reservou um horário para as equipes periodicamente darem sugestões para melhorar o processo. Esse processo de aperfeiçoamento contínuo e gradual foi denominado de *Kaizen* e se dava com o auxílio dos engenheiros industriais.

O relacionamento Toyota-fornecedores era fraco, a substituição dos fornecedores era constante e baseado em preços. A empresa mantinha em seu cadastro uma grande quantidade de fornecedores, que tornava difícil o controle. Os pedidos eram instáveis e a comunicação e o fluxo de informação entre os fornecedores era falho. Os fornecedores também não estavam satisfeitos, pois tinham que manter altos estoques devido à baixa flexibilidade da produção.

Sempre havia a dúvida: produzir a peça internamente ou comprá-la? O principal objetivo de Eiji Toyoda não era integrar todo o sistema de produção numa estrutura vertical e burocrática e nem desintegrá-la totalmente. Foi então que se pensou numa colaboração entre os fornecedores para reduzir custos e melhorar a qualidade, qualquer que fosse o relacionamento formal. Foi quando a Toyota estimulou seus fornecedores a trocarem experiências, de forma a um contribuir com o outro e se tornarem fornecedores complementares e não mais concorrentes. Criou-se um estrutura onde os fornecedores do segundo nível produziam peças para os fornecedores do primeiro nível, por isso a troca de informação era relevante e altamente benéfica para os próprios fornecedores e para a organização.

A necessidade de freqüentes lançamentos foi suprida pelo sistema flexível da Toyota descrito a seguir, que fabricava novos produtos com custo baixo.

Para estabelecer um compromisso Toyota-cliente, foram tomadas algumas decisões: o revendedor passou a ser o primeiro passo do kanban e a produção vinculada às vendas; o sistema incorporou o comprador no processo, para ordenar os pedidos de forma coerente; houve o desenvolvimento de um programa que o cliente Toyota poderia adquirir um modelo novo com desconto. A Toyota procurava ouvir e conhecer os desejos dos clientes e como auxílio utilizava um banco de dados de seus clientes que foi gradualmente montado, e continha informações de pessoas que demonstraram algum interesse pelos seus produtos.

2.2.2 Princípios

O Sistema de Produção Enxuta ou Toyotismo é um sistema que objetiva a eliminação total das perdas, através principalmente de um fluxo contínuo da produção ou adaptação às mudanças da demanda em quantidades ou variedades (MONDEN, 1984, p. 1).

OHNO (1997, p. 25) afirma que os pilares deste sistema são o *Just-in-time* (JIT) e a Autonomia. A definição de JIT seria um processo abastecido com itens necessários, na quantidade necessária e no momento necessário, sem geração de estoque. Já a autonomia é a automação com toque humano. É a capacidade de um equipamento detectar anormalidades e parar automaticamente. Contudo, MONDEN (1984, p. 1) ainda inclui mais dois conceitos-chave do sistema: flexibilidade de mão-de-obra e um pensamento criativo.

A filosofia do JIT é operar um sistema de manufatura simples e eficiente, capaz de otimizar o uso dos recursos de capital, equipamento e mão-de-obra. Sua meta é a eliminação de qualquer função desnecessária no sistema de manufatura que traga custos indiretos, que não acrescente valor para empresa, e que impeça melhor produtividade ou agregue despesas desnecessárias no sistema operacional do cliente (LUBBEN, 1989).

Este sistema simples de manufatura consiste em delegar à produção a função de controle de estoque no chão de fábrica, ao contrário de deixá-lo com o pessoal da programação. Esta função de controle de estoque significa a retirada somente das unidades necessárias na quantidade necessária e no tempo necessário por um pessoal de certo processo no seu fornecedor (MONDEN, 1984, p. 3).

Para isto, é necessário um sistema de comunicação entre os processos, o qual OHNO (1997, p. 27) denominou de *Kanban*. Portanto, o *Kanban* é o meio usado para transmitir informação sobre apanhar ou receber a ordem de produção.

No Sistema de Produção Enxuta, o *Kanban* requer uma produção nivelada, redução do tempo de preparação das máquinas, melhoria do arranjo-físico das

máquinas, padronização dos trabalhos e no aperfeiçoamento das atividades. Todos estes fatores serão vistos posteriormente.

O segundo pilar da Produção Enxuta é a autonomia, que seria a confecção de mecanismos nas máquinas para evitar materiais defeituosos. Este dispositivo é conhecido como *Poka-yoke*. Entretanto, somente os *poka-yokes* não são suficientes para melhoria de qualidade do processo, o sistema de inspeção e gestão da tratamento dos problemas deve ser alterado.

Conforme SHINGO (1996, p. 48), a melhoria da inspeção é, primeiramente, a substituição da inspeção por julgamento, que descobre defeitos, pela inspeção informativa que faz com que seja reduzida a ocorrência de defeitos. Ela proporciona tanto objetividade assim como *feedback* imediato. Existem três tipos de inspeção: auto-inspeção, inspeção-sucessiva e inspeção na fonte. Para todos os tipos, deve ser utilizado o método *Poka-yoke* que possibilita a verificação de 100% da produção através de controle físico ou mecânico.

No método *Poka-yoke*, o processamento e a detecção de problemas são automatizados. Somente a ação para corrigir o problema se diferencia, podendo ser realizada pela própria máquina ou pelo operário. Em ambos os casos, na total automação ou na pré-automatização (correção pelo operador), o custo da mão-de-obra para operar os equipamentos são reduzidos, uma vez que o operário não precisa mais monitorar as máquinas a fim de evitar algum defeito. Do mesmo modo, são obtidas melhorias de segurança aos operários. Até SHINGO (1996, p. 54) ressalta que mesmo os melhores operadores podem falhar e reforça esta idéia ao afirmar que as campanhas de segurança japonesas estão atrasadas em relação aos programas ocidentais. Enfim, deve ser transferida a atenção do operário em detectar situações anormais ou de risco a sua saúde para as máquinas.

O método *poka-yoke* possui dois tipos de função de regulação, o de controle que pára a máquina quando uma anormalidade é detectada e o de advertência que apenas alerta o operador através de alarme ou sinalização. A aplicação de cada um é determinada segundo o volume de ocorrências e da possibilidade ou não de recuperação do defeito. Assim, os *poka-yokes* permitem

suprimir os custos de recuperação de possíveis atrasos gerados por quebra de máquinas, além da perda por processamento de produtos defeituosos.

A mudança na gestão dos tratamentos dos problemas é percebida através da idéia de que a única parada de linha permitida é aquela que garanta que um problema não volte mais a se repetir. SHINGO (1996, p. 155) reforça o apoio da direção para este tipo de evento. A parada de linha no intuito de investigar as causas primárias de um defeito, a fim de eliminá-lo definitivamente, é uma decisão que necessita do consentimento da alta gerência, visto que uma metodologia rigorosa de análise deve ser aplicada e o conflito entre produção x parada de linha não pode interferir.

O conceito-chave da flexibilidade da mão-de-obra é conseguido através do desenvolvimento da polivalência, ou seja, operários que saibam operar diversas máquinas ou postos de trabalhos. Desta forma, foi possível implantar o arranjo-físico celular o qual é composto basicamente da operação em multiprocesso. Portanto, um operário trabalhava sobre diferentes máquinas, aumentando desta forma a produtividade.

Finalmente, o conceito-chave do pensamento criativo ou idéias inventivas, foi capitalizado nas sugestões dos operários através dos círculos de controle de qualidade (MONDEN, 1984). Este processo de sugestões permite melhorias no controle de quantidade, pela adaptação de rotina de operações padronizadas para mudanças no ciclo do tempo, na qualidade assegurada, pela prevenção da repetição de materiais e processos defeituosos, e em respeito à condição humana.

O trabalho em equipe favorecia o desenvolvimento das idéias. SHOOK (1995, p. 59) apresenta o verdadeiro foco deste trabalho em equipe quando cita em seu artigo a chegada nos EUA de turmas de *Team Leaders* que foram enviadas para treinamento em Toyota City, no Japão. Todos eles aprendiam que na resolução de problemas, o objetivo era a supressão do problema. Não se perguntavam cinco vezes “quem”, para encontrar um culpado, como era feito nos EUA quando surgia alguma anormalidade ou defeito na linha. Eles se perguntavam cinco vezes “porquê”, com o claro objetivo de encontrar a causa raiz do problema e eliminá-la definitivamente.

2.2.2.1 Sistema Just-in-Time

O primeiro pilar do Sistema de Produção Enxuta é o *Just-in-time*. O meio pelo qual o Just-in-time flui suavemente no sistema é através do método *Kanban* (OHNO, 1997, p. 27). Portanto, o *Kanban* é um meio para administrar o método de produção Just-in-time. O mesmo tem por objetivo otimizar e controlar o nível de inventário na produção.

O *Kanban* é um sistema de informação para controlar harmoniosamente as quantidades de produção em todos os processos (MONDEN, 1984, p. 3). Esta informação permanece contida num cartão colocado num envelope retangular de vinil, o qual é o conhecido como cartão *Kanban*. Num sistema tradicional de kanban, os cartões são fixados em painéis porta-kanban a fim de sinalizar o fluxo de movimentação e consumo de itens. Os painéis porta-kanban permanecem junto aos pontos de armazenagem espalhados na produção (TUBINO, 1999, p. 92-94).

Entre os tipos usuais de cartão *Kanban*, há o cartão *kanban* de ordem de produção, que diz para uma célula ou processo subsequente produzir certa peça, e o cartão *kanban* de movimentação ou retirada, que serve para interligar duas células ou processos. Ambos os exemplos estão ilustrados na figura 1 (WEBSITE 1, 2002).

FIGURA 1 – CARTÃO *KANBAN* DE (A) PRODUÇÃO E (B) MOVIMENTAÇÃO OU RETIRADA

prateleira númer 15 C 21			processo		
númer do item 104-100-23			usinagem		
nome do item Subconjunto do cilindro			B - 8		
tipo do cilindro 100-23			processo		
			montagem		
			M - 5		
capacidade da	tipo da	númer emissã			
15	B	2/6			

(a)

NÚMERO DA PRATELEIRA 11 A		PROCESSO
NÚMERO DO ITEM 105-100-A-		Usinage
NOME DO ITEM Flange traseira usinada		t - 15
TIPO DO PRODUTO 100-A-32		

(b)

Além destes, BLACK (1998, p. 207) apresenta *kanbans* especiais.

a) *Kanban* de fornecedor – *Kanban* de movimentação para requisitar a entrega de componentes de um fornecedor contratado, conforme figura 2 (WEBSITE 1, 2002).

FIGURA 2 – CARTÃO *KANBAN* DE FORNECEDOR OU SUBCONTRATADO

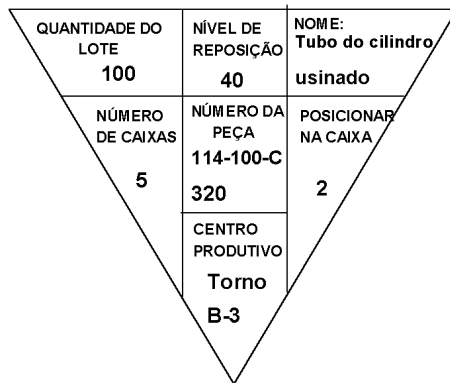
hora de entrada	06:00 14:00 22:00	prateleira nr. 18-A-02	entregar na fábrica: 2
Fornecido por:	JOSÉ DA SILVA & CIA. LTDA.	Número do item: 116-100-A-34	Local de descarga B-05
Ciclo de entrega:	1.3-3	Nome do item: Flange traseira bruta	Tipo de embalagem: container de aço
Estoque do fornecedor:	15	Nome do produto: 100-A-34	Capacidade da embalagem: 60

b) *Kanban* de emergência – Utilizado temporariamente para peças defeituosas, produtos extras ou picos de demanda.

c) *Kanban* de sinalização – Utilizado para fabricação em lote em produção por pedido. Ele é de formato triangular e é afixado a um palete ou pilha de contenedores no ponto de reposição, conforme figura 3a (WEBSITE 1, 2002). Quando os contenedores são removidos, este *kanban* é retirado e colocado no posto de expedição para sinalizar a necessidade de fabricação de componentes adicionais. O esquema de funcionamento é mostrado na figura 3c (WEBSITE 1, 2002).

d) *Kanban* de materiais – Utilizado em conjunto com o *kanban* de sinalização. Este *kanban* pede as matérias-primas para vários processos dentro da fábrica (figura 3b).

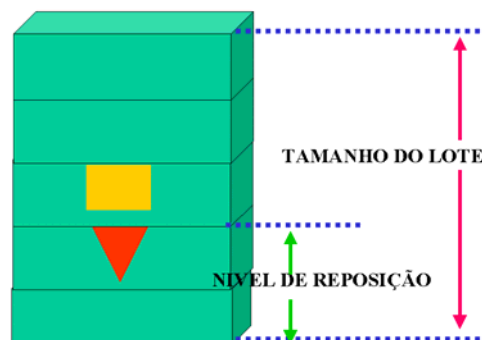
FIGURA 3 – CARTÃO *KANBAN* DE SINALIZAÇÃO (A), CARTÃO *KANBAN* DE MATERIAIS (B) E ESQUEMA DO NÍVEL DE REPOSIÇÃO E CARTÃO DE REQUISIÇÃO (C)



(a)

PROCESSO ANTERIOR	Estoque 02-A-04	→	Torno B-03	PROCESSO SUBSEQÜENTE
Número do item anterior	Nome do item			
120-100-C-320	Tubo de			
Dimensão do material	Capacidade da caixa			
Diam. 50 X 320 mm	20			
Quantidade do lote	Quantidade de caixas			
20	5			

(b)



(c)

Visto que o sistema *kanban* se baseia na troca de informações para ativar a produção ou a movimentação de materiais, de acordo com TUBINO (1999, p. 95), foram adicionadas outras maneiras de transmitir esta informação, seja por uma indicação visual ou por meios informáticos. Entre eles, o autor cita:

- a) *Kanban* contenedor – Consiste em substituir o cartão *kanban* tradicional por um cartão afixado diretamente no contenedor com todas as informações necessárias à sua movimentação e produção. A condição para este tipo de *kanban* que o contenedor deve ser específico ao tipo da peça. Reposição se dará no momento que o mesmo estiver vazio.

- b) Quadrado *Kanban* – Consiste em identificar no chão da fábrica o local onde são armazenados determinados tipos de peças. No momento que o local estiver vazio, é a indicação de reposição.
- c) Painel eletrônico – Consiste no emprego de um painel eletrônico com lâmpadas em cores verde, amarela e vermelha junto ao centro de trabalho produtor. À medida que o usuário consome as peças, ele aciona eletronicamente o painel do fornecedor, autorizando-o a produzir as peças. As cores das lâmpadas indicarão o nível de consumo das peças.
- d) *Kanban* informatizado – Consiste na utilização de computadores, dispositivos de entrada e saída de dados, e de uma rede de comunicações para interligar diferentes pontos produtivos entre si, inclusive fornecedores externos. A técnica conhecida é chamada de EDI (Electronic Data Interchange), ou seja, Troca Eletrônica de Dados (MOLINA, 1995).

Além destes, existe o *kanban* elétrico entre máquinas em processos automatizados. No momento que o nível de estoque for alcançado entre as máquinas, uma fotocélula desliga a máquina do processo precedente (WEBSITE 1, 2002).

SHINGO (1996, p. 229-231) afirma que o *Kanban* pode ser definido por seis regras:

- a) Um processo retira peças do processo anterior somente quando houver cartões *Kanban* removidos.
- b) O processo anterior produz somente a quantidade retirada.
- c) Nada pode ser transportado sem cartões *Kanban*.
- d) Os cartões *Kanban* seguem junto com as peças.
- e) As peças devem ter a sua qualidade assegurada pelo processo anterior.
- f) O número de *Kanbans* reduz-se ao longo do tempo.

O seguimento rigoroso destas regras permite desenvolver o Sistema de Produção Enxuta nos seguintes aspectos:

- a) Controle da produção a contrapedido, quando é produzido somente o que foi vendido.
- b) Previne a superprodução, visto que a produção está limitada pelo número de *kanban*.

Em seu estudo, WOMACK, JONES e ROOS (1992) diversos aspectos foram comparados entre uma montadora que trabalha num sistema de produção em massa e uma que trabalha num sistema de produção enxuta. Os critérios adotados para escolha se basearam numa equivalência em termos de quantidade produzida, tamanho do veículo, número de opcionais montados, entre outros. Os autores concluíram que, em níveis de estoque, a montadora com produção em massa enxuta uma mínima fração daquela com produção em massa.

- c) Evita o transporte desnecessário, pois todos os cartões possuem endereçamento e espaço limitado para estocagem.
- d) Previne defeitos através da garantia que o processo que provoca defeitos já tenha sido identificado.
- e) Impossibilita que a melhoria contínua seja esquecida, devido à redução gradual de estoque.

Não há dúvida do benefício deste controle visto que o número de cartões *Kanban* determina o estoque nas diversas etapas de processamento do produto. Talvez duas regras simplificadas possam ser aplicadas onde os lotes de peças só possam existir se tiverem uma identidade, ou seja, o cartão *Kanban* e que os mesmos são reduzidos ao longo do tempo a fim de impulsionar a melhoria contínua. Qualidade assegurada em cada etapa de processamento é uma premissa subentendida. É inaceitável que peças não conformes avancem no fluxo, visto que reconhecidamente são perdas.

Vale ressaltar a importância da redução gradual da quantidade dos cartões *Kanban* no intuito de aperfeiçoar o processo. Tal método permite que grupos de trabalho compostos por engenheiros, técnicos, supervisores, operários possam trabalhar com planejamento, analisando profundamente o processo, buscando soluções inovadoras e coerentes, levantando recursos quando necessário,

realizando novos treinamentos, entre outros. Uma redução abrupta poderia aumentar os casos de anomalia à níveis onde sobrecarregaria a capacidade de resolução de problemas destes grupos de trabalho.

A redução do estoque não deve se tornar um fim em si mesma, as causas que geram a necessidade é que devem ser eliminadas. Tal redução não pode afetar a estratégia de mercado.

2.2.2.2 Limitações do Sistema

No trabalho desenvolvido por MOURA (1987), as limitações do sistema *Kanban* são expostas da seguinte forma:

- a) É exeqüível em fábricas que produzem peças em unidades completas (discretas), mas não em indústrias de processo.
- b) Não responde rapidamente às mudanças irregulares no produto, seja de modelo ou replanejamento. Portanto, mais adaptado à produção em série.

SHINGO (1996, p. 210-212) estuda o impacto na mudança do consumo em comparação ao ponto do pedido. Se o consumo aumenta antes do ponto de pedido, diminui o tempo entre dois pontos de pedido e, no caso do aumento da demanda superar 30%, a solução é a hora-extra. Se o consumo cai, haverá capacidade ociosa dos operadores. O autor propõe algumas medidas defensivas que devem ser utilizadas somente quando o período estimado de redução da demanda é curto. Algumas delas são: a realização de manutenção não programada nas máquinas, prática de trocas de *setup* e construção de gabaritos.

No caso de ocorrer alteração na demanda após o ponto de pedido, no aumento, é necessário diminuir o tempo de ciclo de produção a fim de evitar uma ruptura no abastecimento. Ao contrário, se ocorre queda, aumenta o

tempo em que os produtos ficam estocados e, portanto, pode ser reduzido o ponto de pedido.

- c) Requer a utilização rigorosa contentores padronizados a fim de evitar erros de contagem e perda de tempo.

TUBINO (1999, p. 109) ainda acrescenta que os operários devem estar treinados e motivados, cumprindo rigorosamente as regras do *kanban* e os equipamentos devem estar em perfeito estado de conservação, com ênfase na manutenção preventiva, evitando paradas inesperadas não suportadas pelo nível mínimo de estoques no sistema. O programa de Manutenção Preventiva Total (TPM) que será discutido adiante, busca responsabilizar os operários neste sentido.

A menos que várias condições sejam atendidas, dificilmente será obtido o JIT, ainda que o método *Kanban* tenha sido introduzido. As condições necessárias para o JIT são a produção nivelada, a redução do tempo de preparação, o arranjo-físico celular e a padronização dos trabalhos.

2.2.2.2.1 Produção Nivelada

É a condição mais importante para o método *Kanban*. Seu objetivo é evitar variações muito grandes em todas as linhas, inclusive nos fornecedores. Todo o esforço deve ser feito para minimizar a flutuação de produção nas linhas de produção.

Para isso, o JIT preconiza um controle da programação em base das previsões, que garante que o produto será entregue na data, e da carga, que garante a viabilidade da fabricação do produto. Para isso, deve existir uma flexibilidade no plano detalhado para atender a produção contrapedido e, o principal fator a fim de garantir a sua eficácia é reduzir o ciclo de produção.

Sobre o controle de carga, OHNO (1997) apresenta o sistema de produção mista em contrapartida do sistema de produção segmentada. A produção mista combina a produção de dois ou mais produtos num curto intervalo de tempo

enquanto que a produção segmentada este período é maior, podendo chegar a semanas. A produção antes distribuída ao longo do mês, da quinzena, da semana passa a ser realizada, devido a evolução da troca rápida de ferramenta (TRF), no dia. O sistema TRF torna-se uma condição essencial, sem a qual fica comprometida a viabilidade deste sistema. Percebe-se que tal sistema se aplica bem em linhas de montagem. Tal sistema reduz significativamente o estoque. Atenção especial deve ser direcionada ao treinamento. Este precisa ser reforçado devido as constantes trocas de assistências de montagem dos acessórios e seqüências de operação que devem ser memorizadas pelos operadores.

Em termos de previsão, a Toyota aplica uma forte pesquisa de mercado que permite modificar a programação da produção a qualquer momento, quando discordâncias da previsão semanal com os pedidos são identificadas, o que reforça a sua dedicação à produção a contrapedido e sua determinação de fabricar apenas o que está vendido. O planejamento ocorre da seguinte forma: a pesquisa de mercado fornece dados para o plano anual onde a produção mensal e semanal são ajustadas às previsões e a produção diária é afinada conforme o aceite dos pedidos. Além disso, subconjuntos comuns são produzidos e apenas na etapa da diferenciação para as exigências do consumidor são consideradas. Portanto, existe a combinação do planejamento preciso de produção por antecipação, com um planejamento contrapedido, à medida que a produção se aproxima da montagem final. É gerado um estoque temporário para atender a demanda real de produtos vendidos e não de produtos que poderiam ser vendidos (SHINGO, 1996, p. 122-124).

O relacionamento do Sistema Toyota de Produção com a parte comercial da empresa quando é proposto estratégias para estender o prazo de entrega, como por exemplo, a identificação de consumidores potenciais através de anúncios de casamentos, número de pessoas aprendendo a dirigir, construindo casa, entre outros. Desta forma poderia antever a demanda mais precisamente a fim de mais uma vez, minimizar os erros de planejamento de produção e, por conseguinte, evita estocagem desnecessária (SHINGO, 1996).

Quanto ao volume, o SPE possui reservas para uma transformação rápida. A flexibilidade é conseguida através de baixas taxas de operação das máquinas.

Além disso, a multifuncionalidade foi desenvolvida, os trabalhadores tiveram suas tarefas ampliadas. A troca de moldes, a manutenção e a limpeza das máquinas passaram a fazer parte de suas funções diárias, já que eram operações simples de serem executadas, e assim evitaram que os operários ficassem ociosos enquanto outros executavam essa tarefa. Com isso, o absenteísmo não afetou mais o cronograma de produção e a mesma pode ser aumentada em momentos de forte demanda, seja pela contratação de operadores temporários para realizar tarefas mais simples ou através de horas-extras.

2.2.2.2.2 Redução do tempo de preparação

Assim como a produção nivelada tornou-se condição essencial para o JIT, a redução do tempo de preparação das máquinas permitiu a produção de vários tipos de produtos (MONDEN, 1984, p. 5). Através da troca rápida de ferramenta (TRF) que quebrou o paradigma de produção de grandes lotes, facilitando o balanceamento de linha e a sua sincronização. Neste sentido, uma melhoria da operação de *setup* deve ser feita. SHINGO (1996, p. 78-80) subdivide o *setup* em interno e externo. O primeiro é composto por operações que podem ser executadas somente quando a máquina estiver parada, enquanto que o segundo não, pode ser feito paralelamente. Com isso, foi possível alcançar o lote unitário.

O tempo de *setup* está dividido em quatro funções: preparação de materiais, fixação e remoção de ferramentas, posicionamento das mesmas e processamentos iniciais e ajustes. A fim de otimizar tais tempos são propostas oito técnicas: determinação de *setup* interno e externo, conversão de *setup* interno para externo, padronização das funções, utilização de fixações rápidas, utilização de dispositivos intermediários, adoção de operações paralelas, eliminação de ajustes e mecanização. Todas as técnicas buscam uma preparação total paralela a máquina em funcionamento, sendo que o tempo de *setup* interno será gasto somente na troca da ferramenta propriamente dita. O princípio de quase todas as técnicas é a simplificação, o justo necessário. Busca-se a eliminação total das perdas nesta

operação. A simplificação deve ser a meta, misturando padronização com funcionalidade. Se algo não tem funcionalidade, elimine-o, coloca SHINGO (1996).

2.2.2.2.3 Arranjo-físico celular

No Sistema de Produção Enxuta o arranjo-físico das máquinas deve rearranjado para o fluxo de produção nivelada. Com isso, utiliza-se outro tipo de arranjo físico, que deixa de ser Por Processo, onde é voltado para os equipamentos e passa a ser Celular, voltado para o produto, classificação de arranjo-físico segundo SLACK et al. (1999, cap. 7).

Paralelamente, a perda causada pelo custo do transporte é eliminada. Melhorar a perda por transporte não consiste em desenvolver sistemas mais eficazes, mas sim a sua eliminação. Não são os meios de transporte que devem ser melhorados. SHINGO (1996, p. 59) ressalta que a melhoria desta perda seria a busca pela total eliminação do transporte visto que é um custo que não agrega valor.

Além disso, somente uma melhoria no arranjo-físico para amenizar o impacto negativo do aumento da frequência do transporte que seria necessário para manter a produção nivelada num arranjo-físico por processo.

2.2.2.2.4 Padronização dos trabalhos

Para a produção enxuta, a operação padronizada deve ser diferente da operação usual, a qual descreve todas as seqüências do operário. A folha de operações padronizadas especifica o ciclo de tempo, rotinas de operações padronizadas e quantidades padronizadas de material em processo.

A rotina de operações padronizadas indica a seqüência de operações que devem ser seguidas por um operário num processo múltiplo de departamento. Cada

departamento de produção é informado da quantidade por dia e o tempo de ciclo de tempo uma vez em cada mês anterior. Desta forma, é possível determinar a quantidade de operários necessários para este processo produzir uma unidade de produção em um ciclo de tempo (MONDEN, 1984, p. 5). Assim, é possível determinar as tarefas dos operários a fim de manter a produção nivelada.

A determinação do tempo unitário deve ser baseada na demanda real do produto. Deve-se buscar uma taxa de utilização da mão-de-obra de 100% com relação ao tempo unitário. Segundo SHINGO (1996, p. 140), não é considerado ganho de produtividade quando as melhorias no processo permitem aumentar a produção acima da demanda do mercado. Ganho de produtividade só existe quando, para uma demanda fixa, consegue-se reduzir o número de operadores necessários para produzir a mesma quantidade de peças.

SHINGO (1996, p. 245) reforça que é importante entender como as técnicas individuais do *Kanban* se encaixam no sistema como um todo. A falta de entendimento pode causar o fracasso do programa de implementação do JIT e levá-lo ao descrédito. A mudança cultural e de comportamento de uma empresa requer muito esforço e horas de treinamento para que os colaboradores se envolvam e apliquem os princípios difundidos.

A programação automática e simples como é feita pelo sistema *kanban* é uma eliminação de perda, não só na produção, assim como na administração. Além de atuar no controle da produção diretamente, reduz a burocracia administrativa por simplificar a comunicação de pedidos nas diversas etapas de processamento (WOMACK, JONES, 1998).

Outra contribuição do JIT é o controle de estoques intermediários. Sob um sistema MRP, o departamento de Finanças controla a posição destes estoques a fim de quantificar o valor agregado ao mesmo. Sob o JIT, sendo o fluxo de materiais unidirecional, não há retorno para o almoxarifado. Com a meta de lotes pequenos, chegando a lotes unitários, o fluxo de materiais é rápido. Portanto, monitorar a quantidade de materiais em cada local ao mesmo tempo é inviável, e totalmente desnecessário (LUBBEN, 1989).

A extensão do sistema Kanban aos fornecedores é um processo natural e necessário, porém não pode ser apenas uma transferência de problemas. Com a finalidade de se integrar ao JIT, durante a década de 80, algumas empresas norte-americanas transferiram para seus fornecedores seus estoques internos, obrigando-os a reduzir a quantidade e tempo entre cada entrega. Como coloca WOMACK, JONES e ROOS (1992), a única intenção de tais empresas era de transferir os custos associados dos estoques aos seus fornecedores, uma vez que não foi estimulada a produção de peças em lotes menores nos mesmos. Toda a cadeia de valor necessita ser estudada e, dependendo do produto, as peças compradas nos fornecedores participam de forma significativa no valor final do produto acabado. Logo, a fim de obter um preço competitivo, as perdas devem ser eliminadas em todos os subconjuntos do produto, sejam produzidos internamente na fábrica ou não.

Segundo SHINGO (1996, p. 232), o teor do sistema MRP não pode ser comparado ao Sistema Toyota de Produção devido ao primeiro ser um método de encontrar condições ótimas, previamente desconhecidas através de processamento computacional aos sistemas de controle convencionais, enquanto que o segundo se concentra no aprimoramento contínuo no sistema de controle e gerenciamento. Para LUBBEN (1989), o MRP projeta um sistema produtivo incluindo a ocorrência de constantes desvios e sua falta de estabilidade no planejamento da produção. A fim de antecipar e permitir rápidas mudanças do planejamento da produção, o sistema MRP tenta resolver o complexo problema de planejamento através de um sistema de controle complexo. O resultado final seria um sistema que não é auto-regulado e que continua a aumentar a sua complexidade. O erro seria a utilização de uma ferramenta de planejamento, o MRP, como uma ferramenta de execução. O JIT seria o método preferido para controlar o planejamento. SLACK et al. (1999, p. 375-377) citam uma série de vantagens da combinação dos dois sistemas, em vez de utilizar simplesmente o MRP convencional.

- a) Não há necessidade de se gerar ordens de trabalho entre setores.
- b) O estoque em processo somente precisa ser monitorado entre as células e não mais para cada atividade.

- c) A lista de materiais tem menos níveis do que num sistema MRP convencional.
- d) As informações necessárias referentes a roteiros e processos são mais simplificadas.
- e) O planejamento e o controle dos centros de trabalho são simplificados.
- f) Lead times e estoque em processo são reduzidos.

Existe uma certa coerência na argumentação de que o MRP está voltado para o controle computadorizado, ainda mais quando reforça esta condição quando se discute a utilização dos computadores no controle estatístico de processo. O computador seria apenas uma ferramenta, um meio para atingir um fim, o mesmo não é capaz de melhorar ou aprimorar as condições ótimas, apenas de calculá-las. São os recursos humanos de uma empresa que podem realizá-lo e tais fundamentos estariam no STP. Talvez o único cuidado em tal comparação seria o fato de que uma condição ótima à ser calculada pelo MRP poderia estar subentendido também que o processo deveria estar primeiramente aprimorado.

SHINGO (1996) acredita que a expansão dos princípios no Sistema Toyota Produção cada vez mais nos processos iniciais tais como usinagem, forjamento, fundição, entre outros, seria assunto de grande importância no desenvolvimento do mesmo. Não apenas na produção, mas também na administração, como a busca pela eliminação de perdas e simplificação de rotinas.

2.3 A TEORIA DAS RESTRIÇÕES

2.3.1 Histórico

A Teoria das Restrições, a chamada TOC – *Theory of Constraints*, é uma filosofia que compõe um sistema de administração da produção que tem ocupado espaço nas publicações da área cujo nome é Tecnologia da Produção Otimizada (*Optimized Production Technology - OPT*). Esta técnica foi desenvolvida por um

grupo de pesquisadores israelenses, do qual fazia parte o físico Eliyahu Goldratt, o maior divulgador da técnica (CORRÊA, GIANESI, 1993, p. 143).

De acordo com GOLDRATT e FOX (1989, p. 4), devido às novas técnicas vindas do oriente, houve um aumento da participação dos japoneses nas indústrias do setor de eletrodomésticos em 1975, automobilística em 1980 e eletrônica em 1985 no âmbito mundial. Percebeu-se uma evolução na qualidade dos produtos. Atualmente o zero defeito está sendo a meta e, antes de 1970, aceitava-se uma ordem de 10% de produtos não-conformes. Ainda pode-se associar a redução do ciclo de vida dos produtos, que passou de décadas para anos ou até meses com o intuito de manter a renovação exigida pelo mercado.

Ao mesmo tempo, as empresas aperfeiçoaram seus processos, controlando os níveis de estoques dentro das fábricas através de sistemas logísticos, tais como MRP, MRP II, *Kanban*, entre outros e, segundo GOLDRATT e FOX (1989, p. 12) os giros nos inventários puderam ser aumentados de cinco vezes para cinquenta vezes por ano.

Toda esta evolução demonstra a busca das empresas pelo desenvolvimento de uma vantagem competitiva a qual está cada vez mais acirrada à medida que tempo, recursos e capital se tornam escassos.

A fim de otimizar os sistemas de produção, Goldratt desenvolveu uma técnica computadorizada (*software* do OPT) que auxilia a programação da produção, ao ritmo ditado pelos recursos mais fortemente carregados, ou seja, os gargalos ou as restrições do sistema (SLACK et al., 1999, p. 349). Segundo RADOVILSKY (1998, p. 114), as restrições do sistema podem ser trabalhadores, máquinas, demanda de mercado, políticas da companhia e até leis ou regulamentos que afetem a empresa. Normalmente, a restrição física é um recurso gargalo, ou seja, a capacidade do mesmo é menor ou igual a demanda do mercado. Tal recurso gargalo, se não for bem programado ou administrado, é uma provável causa de desvios dos objetivos no fluxo de produção da fábrica.

Este programa não é uma técnica que tenha caído no domínio público e, para adotá-la, a empresa terá que comprar o programa. No Brasil, ANTUNES JUNIOR e RODRIGUES (1997) analisam, em seu trabalho, as ações de melhorias

necessárias para levantar a capacidade das restrições. Porém, de acordo com CHECOLI e MONTEIRO (2000), ainda há poucos estudos publicados sobre seu uso e resultado. Em seu estudo na indústria têxtil, PRADO e CAULLIRAUX (2000) apresentam as etapas necessárias para implantação da filosofia da TOC numa cadeia de suprimentos. A conclusão seria que a grande restrição dos sistemas está não apenas na sincronização das plantas, mas principalmente entre diferentes integrantes da cadeia. Já o trabalho de CHECOLI e MONTEIRO (2000) apresenta o resultado de uma indústria em Curitiba. O aumento da sua capacidade de produção em 20%, sem investimentos de capital, reduzindo o estoque em processo e horas-extras, melhorando o nível de atendimento aos clientes, simplificando a administração até 4 meses, foi alcançado.

2.3.2. Conceitos

Com o objetivo de vencer a corrida pela vantagem competitiva, GOLDRATT e COX (1986) afirmam que a empresa capitalista tradicional deve atingir a sua meta que, segundo os próprios autores, é “ganhar mais dinheiro hoje e no futuro”. Entretanto, as empresas devem saber medir como ganhar dinheiro.

A fim de medir o alcance da sua meta, GOLDRATT (1991, cap 3-5) propôs relacioná-la com alguns indicadores, desdobrando-os em dois níveis: Globais e os Operacionais. Para os indicadores globais da empresa, primeiramente, haveria o Lucro Líquido como medidor absoluto, colocando este número no demonstrativo de lucros e perdas. Em segundo, seria o Retorno sobre Investimento como medidor relativo, calculado pela divisão do lucro líquido pelo investimento, informada no balanço. Finalmente, o Fluxo de Caixa, que não representa uma medida, mas uma condição necessária importante.

Entretanto, os indicadores globais são medidos na alta gerência. Por isso, é necessário o segundo nível de indicadores para gerenciamento do dia-a-dia da organização. O parâmetro usualmente utilizado seria o custo, que segundo o ponto de vista de GOLDRATT e COX (1986), não seria o mais indicado, pois poderia

impedir uma melhoria na qualidade do produto ou no aumento de giros de inventário.

Portanto, é proposta a substituição deste parâmetro pelos indicadores operacionais: Ganho, Inventário e Despesa Operacional. O Ganho seria o índice no qual o sistema gera dinheiro através das vendas. Inventário é todo o dinheiro que o sistema investe na compra de coisas que o sistema pretende vender e a Despesa Operacional é todo dinheiro que o sistema gasta para transformar Inventário em Ganho.

Estas três medidas globais agiriam nas antigas formas de medição de resultados, ou seja, ao reduzir o inventário, por exemplo, estaria reduzindo os custos de carregamento do inventário que seriam despesas operacionais. Além disso, ainda afetaria o Ganho também. Haveria um melhor desempenho no prazo de entrega e menor *lead-time* cotado. Estes se relacionam diretamente com as vendas da empresa.

Segundo YÜCESAN e GROOTE (2000, p. 118-130), *lead-time* pode ser definido como o tempo entre a autorização da produção até o seu completo processamento, no qual o produto está pronto para atender a ordem de pedido. Este tempo é composto pelo tempo de processamento da peça e/ou do lote, tempo de transporte e manipulação e tempo de espera. O tempo de espera é aquele em que a peça aguarda a liberação da máquina ou equipamento para ser processado. Caso seja uma linha de produção, é o tempo que as peças aguardam nas filas que se formam em frente dos processos, ou seja, o material em trabalho.

Se o *lead-time* entre a produção e a inspeção de uma peça ou o surgimento e a detecção de um problema de qualidade forem longos, o número de peças não conformes no sistema terá as mesmas proporções (CORDON, 1995, p. 276-295). Além disso, pode dificultar a encontrar a causa raiz para o caso de um problema de qualidade. Este último fenômeno é um fator motivante para limitar o material em trabalho (YÜCESAN, GROOTE, 2000, p. 118-130), sem esquecer de que todo estoque requer um custo e um espaço.

Conforme LUTZ, DAVIS e SUN (1998, p. 301), tamanho e localização dos estoques são importantes na indústria de manufatura visto que altos níveis de inventário protegem a produção contra instabilidades na produção, reduz a

freqüência de compra de matéria-prima e pedidos de urgência, e ajuda satisfazer a necessidade do cliente. Em contrapartida, um aumento de *lead-time* dificulta a identificação de fontes de defeito, aumenta o tempo necessário para chegar ao mercado produtos melhorados, aumenta os custos operacionais, reduz a precisão da data de entrega, e pode resultar em preços sem competitividade dos produtos acabados.

Com menor inventário, a empresa aumenta a sua reatividade no processo, eliminando as causas dos defeitos e, por conseguinte, a sua qualidade. Consegue mais rapidamente que as melhorias de produto realizadas pela Engenharia cheguem ao cliente final. Consegue-se uma maior precisão da previsão da demanda do produto, melhorando o desempenho no prazo de entrega. A margem de lucro é aumentada, pois não são gastas despesas operacionais adicionais como hora-extra para entregar o produto conforme prometido pelo departamento de vendas, visto que o *lead-time* de fabricação será menor que o prometido, ainda sim contando com uma margem de segurança. O investimento por unidade é menor, visto que não há máquinas com capacidade adicional nas operações finais de fabricação. A carga de trabalho é mais uniformemente distribuída ao longo do mês.

Segundo GOLDRATT e FOX (1989, p. 68), a manutenção de altos inventários tinha o objetivo de garantir a venda e as antigas medidas de desempenho estavam concentradas para uma visão de curto prazo, negligenciando sua importância à longo prazo. Faltava, portanto, um sistema logístico efetivo para baixar o inventário sem comprometer o Ganho, nem aumentar a Despesa Operacional.

De acordo com GOLDRATT e FOX (1989, p. 76), haveria as seguintes soluções:

- a) Reestruturar a fábrica colocando recursos de menor capacidade nas operações primárias e nos processos subseqüentes máquinas de maior capacidade a fim de não criar inventário. Devido ao custo e os riscos de implantação, além das possíveis variações do *mix* de produção, a idéia é descartada pelos próprios autores.

- b) Cumprir os programas de produção coerentes, todavia, o conceito tradicional de que as máquinas e a mão-de-obra devem ser rentáveis se traduz por uma maior taxa de ocupação e faz com que não haja um correto balanceamento da linha. Máquinas de maior capacidade trabalham na mesma taxa de ocupação das menores, ocasionando estoques intermediários no processo, visto que existem máquinas com capacidade excessiva nas operações primárias.
- c) Adotar um ritmo de produção determinado pelos recursos de menor capacidade, porém que garantam o Ganho. Estes recursos estariam interligados como, por exemplo, a correia transportadora de Ford ou os cartões *Kanban* de Ohno. O objetivo de ambos é controlar o estoque entre os diversos processos dentro de uma fábrica. No entanto, estes sistemas requerem máquinas confiáveis, visto que a parada de uma máquina ocasiona a parada de toda a linha e, o custo, esforço e o tempo para melhorar o seu processo não são irrelevantes.

A Teoria das Restrições propõe a utilização de cinco passos globais a fim de que possam ser aplicados os seus princípios. O seu funcionamento está relacionado com a marcha de uma tropa (GOLDRATT e COX, 1986) o qual originou a sua metodologia Tambor-Pulmão-Corda (TPC) descrita no item 2.3.5. Esta metodologia é a base da manufatura sincronizada.

2.3.3. Processo de Decisão na Teoria das Restrições

Segundo GOLDRATT (1991), “focalizar tudo acabará levando a focalizar nada”. Como todo sistema tem, pelo menos, uma restrição, o autor criou um processo decisório com cinco passos globais a fim de direcionar o gerenciamento do sistema produtivo sob a ótica da Teoria das Restrições.

- a) Passo 1 – Identificar as restrições do sistema – Identificar os recursos cuja capacidade produtiva restringe a capacidade do sistema como um todo de atender a seu fluxo de vendas de produtos.

- b) Passo 2 – Decidir como explorar as restrições do sistema – Explorar significa extrair o máximo possível das restrições do sistema. Não perder tempo algum nas máquinas-gargalo, por exemplo. No caso da restrição ser o mercado, os recursos produtivos serem não-gargalos, a exploração significa entregar com pontualidade de 100%, e não de 99% (GOLDRATT, 1991).
- c) Passo 3 – Subordinar qualquer coisa à decisão anterior – Todo o sistema será adequado conforme a necessidade das restrições. Os gargalos definem o fluxo de produção e os estoques, a ocupação dos recursos não-gargalos, entre outros.
- d) Passo 4 – Elevar as restrições do sistema – Elevar significa “levantar a restrição” (GOLDRATT, 1991). Este passo significa aumentar a capacidade do gargalo a fim de aumentar a capacidade do sistema. Vale ressaltar que a capacidade do gargalo só é aumentada após a sua máxima exploração. Por isso este é o quarto passo e não o segundo.
- e) Passo 5 – Se uma restrição for quebrada, voltar ao primeiro passo - No momento em que uma restrição for elevada, surgirá uma nova. Então o processo deve ser recomeçado a fim de otimizar o ganho. Contudo, GOLDRATT (1991) alerta para que a inércia no tratamento dos gargalos não passe a ser a restrição do sistema.

2.3.4. Regras da Teoria das Restrições

A fim de maximizar a utilização de um recurso-gargalo, a TOC dita nove regras (CORRÊA, GIANESI, 1993, cap 5):

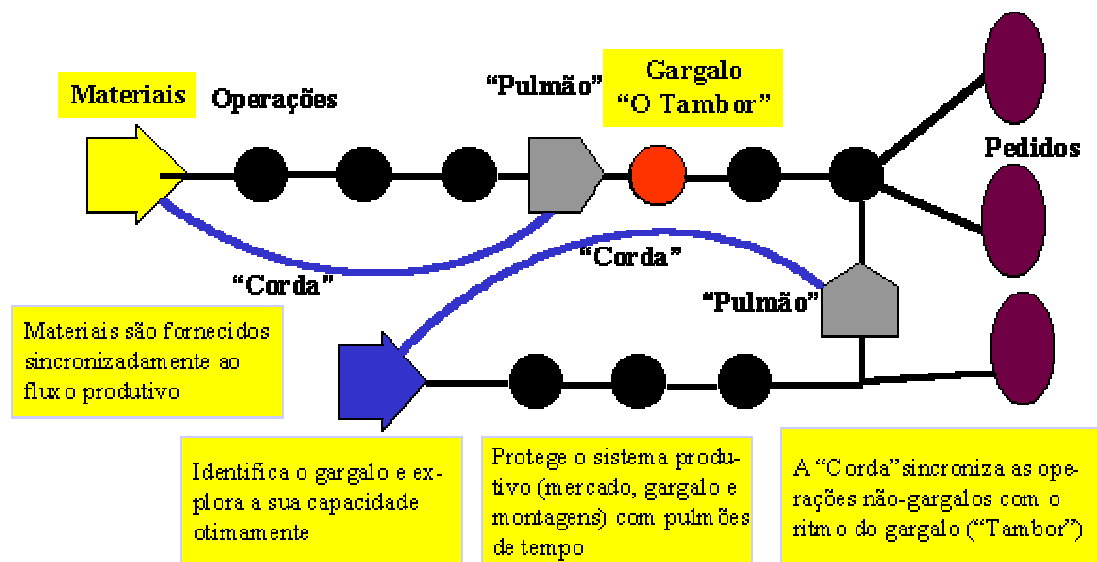
- a) Balanceie o fluxo e não a capacidade das máquinas. A ênfase está no fluxo de materiais e não na capacidade dos recursos.
- b) A utilização de um recurso não-gargalo não é determinada por sua disponibilidade, mas por alguma outra restrição do sistema (gargalo).
- c) Utilização e ativação de um recurso não são sinônimos. Os recursos devem ser utilizados na sua capacidade para que implique na contribuição dos objetivos do OPT. Não devem ser apenas ativados.

- d) Uma hora ganha num recurso-gargalo é uma hora ganha para o sistema global.
- e) Uma hora ganha num recurso não-gargalo não é nada, é só uma miragem. Uma preparação economizada num recurso não-gargalo é apenas uma ociosidade para este recurso, já que o tempo de processamento é determinado por outra restrição do sistema, e não por sua disponibilidade.
- f) O lote de transferência pode não ser e, freqüentemente, não deveria ser, igual ao lote de processamento. O lote de processamento é aquele tamanho de lote que vai ser processado num recurso antes que este seja repreparado para processamento de outro item. Já o lote de transferência é a definição do tamanho dos lotes que vão ser transferidos para as próximas operações.
- g) O lote de processamento deve ser variável e não fixo. O tamanho dos lotes de processamento é uma função da situação da fábrica e pode variar de operação para operação. Estes tamanhos de lote são estabelecidos pela sistemática de cálculo, que leva em conta custos de preparação, as necessidades de fluxo de determinados itens, os tipos de recurso, entre outros.
- h) Os gargalos não só determinam o fluxo do sistema todo, mas também definem seus estoques. Estes são dimensionados e localizados em pontos tais que consigam isolar os gargalos de flutuações estatísticas propagadas por recursos não-gargalos que os alimentam.
- i) A programação de atividades e a capacidade produtiva devem ser consideradas simultaneamente e não seqüencialmente. *Lead-times* são um resultado da programação e não podem ser assumidos a priori. O sistema OPT considera as limitações de capacidade do sistema dos recursos-gargalos e decide por prioridades na ocupação destes recursos. Com base na seqüência definida, o sistema calcula os *lead-times* e, portanto, pode programar melhor a produção.

2.3.5. Manufatura Sincronizada

A solução apresentada por GOLDRATT e FOX (1989, p. 96) para o sistema logístico interno seria o controle de estoque entre processo nas operações onde estão alocadas as máquinas de menor capacidade. Seria um sistema Tambor-Pulmão-Corda (TPC). Ou seja, o Tambor seria o recurso com restrição de capacidade (RRC) que dita o ritmo da produção e que deve ter condições de atender a demanda. O Pulmão seria o estoque antes deste RRC no intuito de mantê-lo funcionando apesar das perturbações no fluxo. Finalmente a Corda seria a interligação entre o RRC e os recursos nas operações primárias, para fins de redução e controle de inventário. A figura 4 mostra o esquema na metodologia Tambor-Pulmão-Corda (WEBSITE 2, 2002).

FIGURA 4 – METODOLOGIA TAMBOR-PULMÃO-CORDA NA PRODUÇÃO SINCRONIZADA



Segundo YÜCESAN e GROOTE (2000, p. 118-130) o sistema tambor-pulmão-corda de GOLDRATT e FOX (1989, p. 96) onde o recurso gargalo dita o passo com o qual novos pedidos são liberados para o chão de fábrica, pode ser

considerado um sistema de produção puxada neste gargalo. Isto se deve ao fato dele manter constante o nível de material em trabalho antes do gargalo.

Deve-se manter um pulmão de tempo também nas operações de montagem que são alimentadas pelos RRC's na intenção de que qualquer interrupção dos fornecedores ou de alguma máquina não comprometa o prazo de entrega da fábrica.

O ritmo do tambor deve ser programado para demanda e existem quatro condições complicadoras:

- a) *Lead-times* diferentes desde os RRC's até as datas de entrega.
- b) RRC que alimenta outro.
- c) Tempo de preparação do RRC.
- d) RRC que fornece mais de uma peça para o mesmo produto.

Assim sendo, deve-se ter um estoque das peças certas, nas quantidades corretas para proteger por um certo tempo. Qualquer outro local que haja estoque seria uma grande perda.

Para manter a vantagem competitiva, além de implantar o processo tambor-corda-pulmão, a empresa deve fazer evoluir o processo através de um aprimoramento contínuo ou para reduzir o tamanho do pulmão continuamente ou para eliminar o RRC. À medida que os RRC's são eliminados, novos surgem e o estoque de segurança é deslocado e recalculado. Esta dinâmica permitirá aumentar o lucro líquido, o retorno sobre investimento e o fluxo de caixa continuamente.

De acordo com RADOVILSKY (1998, p 114), a peça central do sistema Tambor-pulmão-corda é a inserção de pulmões de peças para proteger o sistema contra inevitáveis flutuações nos tempos de processamento. Estas flutuações são causadas por disfunções internas que ocorrem nas operações de manufatura ou de serviço. O tempo do pulmão aumenta o tempo de processamento de um mínimo absoluto requerido para processar as peças para uma quantia de tempo suficiente para absorver estas interrupções. DUCLOS e SPENCER (1995, p. 179) concordam que é possível maximizar o ganho no gargalo através da sua proteção contra instabilidades da produção. Sobretudo quando a taxa de utilização da máquina

precedente e posterior ao gargalo comprometer o funcionamento deste último, devido a variação dos tempos de processamento. Segundo este autor, o pulmão poderia ser criado movendo parte do tempo de estoque de produto acabado antes da operação gargalo, tornando-o material em trabalho. O pulmão de tempo seria monitorado continuamente a fim de assegurar a utilização do gargalo o máximo possível. A variação dos tempos de processamento pode atingir níveis elevados e, quando o pulmão estiver vazio, se o tempo de processamento da estação precedente ultrapassar o tempo de processamento do gargalo resultará em ociosidade para o mesmo, algo que não é desejável.

Portanto, ao contrário do Sistema Toyota de Produção, o estoque causado pelo pulmão em frente do recurso gargalo é considerado como uma reserva de manufatura estratégica que protege o sistema das flutuações do processo, tanto antes como depois do gargalo.

2.3.6 Vantagens e Limitações da Teoria das Restrições

Segundo CORRÊA e GIANESI (1993, p. 164), um dos pontos fortes a respeito do programa OPT é seu sistema de programação de atividades, que combina algoritmos de programação finita para frente no RRC e programação infinita para trás nos não-RRC's, a fim de gerar os programas de atividades para os vários recursos produtivos da empresa. A programação finita para frente no RRC é efetuada a fim de mantê-lo ocupado ao longo do tempo. Com a definição do instante em que as operações são iniciadas no RRC, estabelece-se um pulmão de tempo de proteção antes do RRC e, em seguida, são programadas as operações para trás pela definição das necessidades de chegada dos materiais no pulmão. Por isso, pode ser usada como uma excelente ferramenta de simulação, calculando os lead-times de produção.

Além disso, a Teoria das Restrições auxilia as empresas a focalizarem sua atenção nos problemas mais críticos, os recursos-gargalos. Com isso, permite observar os esforços de implantação mais rápido.

Em contrapartida, segundo CORRÊA e GIANESI (1993, p. 143), apesar da filosofia da Teoria das Restrições aplicada ao *software* OPT (Tecnologia da Produção Otimizada) sugerir que se trate de um método de otimização, nada garante que se alcance soluções ótimas. Isto é devido ao fato da técnica ser baseada em uma série de procedimentos heurísticos, muito dos quais os proprietários dos direitos de exploração do sistema não tornaram públicos até o momento. Entretanto, deve-se destacar que muitas das premissas da TOC não requerem um *software*.

Ainda segundo estes autores (CORRÊA, GIANESI, 1993, p. 165), se conforme o *mix* de produção, o recurso-gargalo flutuar entre os diversos equipamentos do sistema de produção, pode haver um comprometimento nos resultados da OPT. Isto ocorre uma vez que aumenta o número de variáveis que o sistema deve controlar e programar.

DUCLOS e SPENCER (1995, p. 176) afirmam que o caráter de propriedade intelectual patenteada do algoritmo de programação da produção de Goldratt desencorajou pesquisas com seu algoritmo e limitou a aceitação entre pesquisadores e praticantes.

CORRÊA e GIANESI (1993, p. 164) alertam que as decisões para otimizar o sistema são centralizadas, restando pouca área de manobra para os operários. Isto poderia comprometer a participação da força de trabalho com os objetivos da empresa. Além disso, a TOC depende basicamente da identificação dos gargalos. Isto nem sempre é fácil, uma vez que muitos fatores podem contribuir para mascarar os verdadeiros gargalos tais como lotes excessivos, práticas tradicionais da produção, etc.

SMITH (1994) coloca que, assim como o JIT, a TOC assume um ambiente estável. Quando o ambiente é instável, não-RRC's podem tornar-se RRC's. Isto poderia ser causado pela alteração do *mix* de produção. Todavia, a TOC é menos sensível a variação da demanda que o JIT. SOARES (1997) afirma que, a médio prazo, em ambientes não repetitivos e com variações da demanda, a TOC seria mais recomendada que o JIT, visto que pode gerenciar as restrições da capacidade.

Estudos compararam a Teoria das Restrições com o Just-in-time e o MRP. Alguns (AGGARWAL e AGGARWAL, 1985, p. 21-38; GRUNWALD, STRIEKWOLD, WEEDA, 1989, p. 281-292) concluíram que todos os três sistemas possuem

vantagens e desvantagens, sendo as condições específicas do sistema em estudo e o seu tipo de gerenciamento que determinarão a melhor solução. Contudo, outros (AGGARWAL, 1985, p. 8-16; PTAK, 1991, p. 7-11) afirmam que um sistema híbrido seria mais bem sucedido do que um dos sistemas individualmente.

Os princípios apresentados por GOLDRATT e FOX (1989) são concordantes que estoque em excesso é custo e levam mais em consideração as interrupções de fluxo e pretende ser mais rigoroso no controle de estoque interprocessos do que a ferramenta *Kanban*. O TPC lança as ordens de produção a partir das operações primárias, processando a matéria-prima nas operações necessárias até a chegada no pulmão enquanto que o *kanban* “puxa” a produção através de efeito cascata, podendo manter, por mais pequeno que seja, um estoque intermediário nos pontos de troca do *kanban* de transporte pelo de ordem de produção. A vantagem do *kanban* seria uma maior flexibilidade quanto a volume à curto prazo, devido aos estoques e da capacidade reserva guardada. Outro fator pouco discutido por GOLDRATT e FOX (1989), porém muito perceptível até pela diagramação constantemente mostrada, o TPC parece se adaptar melhor à uma fábrica de produtos mais diversos associada a uma demanda flutuante, onde deve-se construir um pulmão de tempo e não de quantidade de peças à medida que os pedidos são firmados. No pulmão de tempo, controla-se o somatório dos tempos das operações previstas no recurso-gargalo cuja variedade pode ser maior que no pulmão de quantidade de peças. Neste segundo caso, a própria quantidade de peças já indica o tempo do pulmão visto que o tempo de operação de uma peça tem pouca variabilidade.

Em ambos os sistemas, a melhoria contínua é fundamental para o desenvolvimento do processo de fabricação e redução de estoques. Neste ponto GOLDRATT (1991) admite que os japoneses mostraram ao mundo a importância que a redução do inventário, em particular de produtos acabados e em material em processo, tem para incrementar Ganhos futuros nas empresas.

2.4 CONFIABILIDADE

2.4.1 Conceitos

A Confiabilidade mede a habilidade de desempenho de um sistema, produto ou serviço como esperado durante o tempo (SLACK et al., 1999, p. 483). Ou seja, é a capacidade de um produto manter a sua qualidade ao longo do tempo. BERGAMO FILHO (1997, cap. 1) define tecnicamente a confiabilidade como sendo, “a probabilidade de um produto executar, sem falhas, uma certa missão, sob certas condições, durante um determinado período de tempo”. Desta forma, um produto que tenha boa confiabilidade é aquele que apresenta poucas falhas à medida que envelhece.

Falha é uma não-conformidade com algum critério de desempenho claramente definido (MIRSHAWKA, OLMEDO, 1993, p. 46). Segundo os Princípios da Engenharia de Confiabilidade, as falhas são uma função do tempo. Em diferentes etapas da vida de um produto, a probabilidade de que falhe será diferente.

NAKAJIMA (1989, p. 35) apresenta três períodos (A, B e C) distintos de causas de falhas nos equipamentos. O seu gráfico é conhecido como “curva da banheira” devido à semelhança com esta última, conforme Figura 5. Inicialmente na fase de infância (período A), as taxas de falhas são altas, visto que na implantação de novos equipamentos ocorrem erros de projeto e fabricação dos mesmos. Na medida em que tais erros são corrigidos pelo pessoal de projeto e fabricante dos equipamentos, as taxas de falhas vão sendo reduzidas até se estabilizarem no tempo. Tal período pode ser determinante no desempenho do equipamento ao longo de toda a sua vida útil.

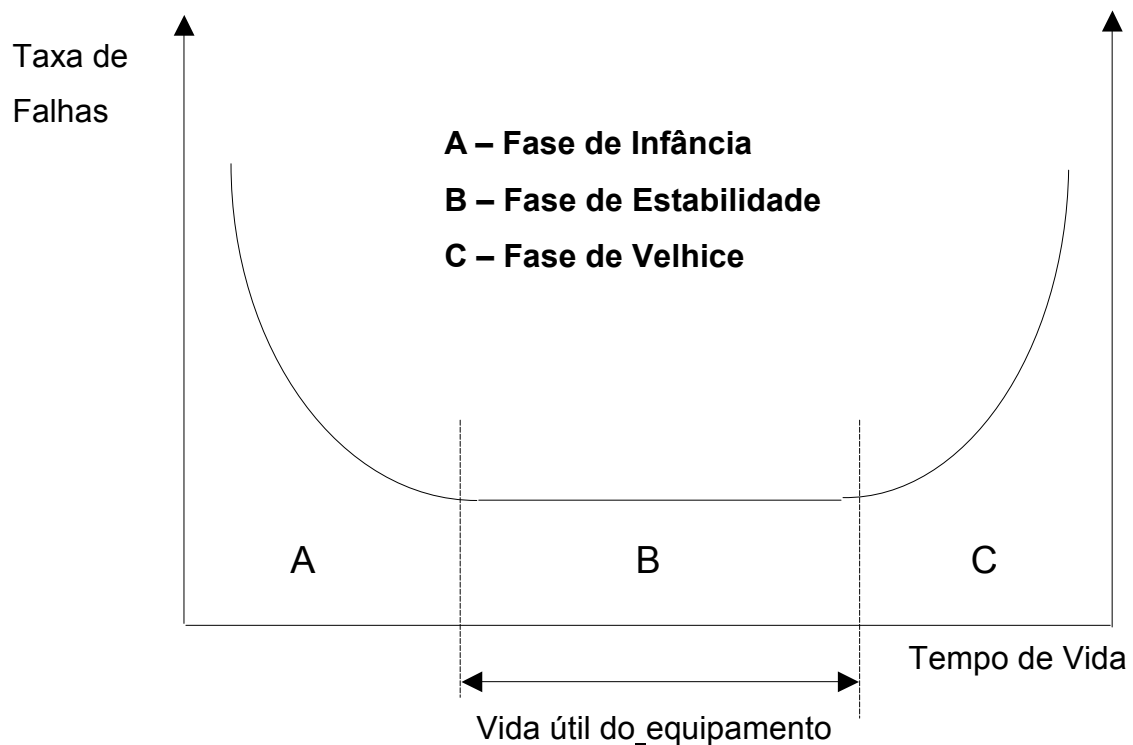
No segundo período, fase da estabilidade (período B), onde as taxas médias de falhas permanecem constantes ao longo do tempo e as falhas ocorrem devido a erros na operação dos equipamentos. Neste período, o treinamento e medidas para garantir uma operação adequada dos equipamentos são necessários.

No último período, fase de velhice (período C) as taxas médias de falhas sobem rapidamente devido ao desgaste dos equipamentos por alcançarem o limite natural de vida útil.

Segundo SLACK et al. (1999, p. 481), há três formas principais de medir falhas. Seja através da Taxa de falhas, da Confiabilidade ou da Disponibilidade. Os dois primeiros são diferentes formas de medir a tendência de uma produção falhar. Todavia, a Disponibilidade é uma medida das conseqüências da falha na produção.

Além desses parâmetros, BERGAMO FILHO (1997, cap. 1) afirma que é necessário conhecer a Manutenibilidade. Segundo a norma MIL-STD-778 (MIRSHAWKA, OLMEDO, 1993, cap. 1), “Manutenibilidade é uma característica de projeto e instalação expressa como a probabilidade de que um item se conformará a condições especificadas dentro de um dado período de tempo, quando a ação da manutenção é praticada segundo procedimentos e recursos prescritos”. De forma simplificada, pode-se entender Manutenibilidade como a facilidade de executar a manutenção.

FIGURA 5 – VARIAÇÃO DA TAXA DE FALHAS AO LONGO DO TEMPO



2.4.2 Parâmetros da Confiabilidade

Devido a dificuldade de se compreender concretamente o que seja confiabilidade, foram criados parâmetros para sua medição. Os principais são:

- a) Tempo Médio entre Falhas (*MTBF – Mean Time Between Failures*)- Utilizado em produtos ou equipamentos que são possíveis de serem reparados, ou seja, após uma manutenção corretiva, voltar a cumprir a sua função desejada. A medida é exatamente o tempo que transcorre entre uma falha e outra.

O cálculo estimativo do *MTBF*, segundo BERGAMO FILHO (1997, p. 15) e MIRSHAWKA e OLMEDO (1993, p. 253) pode ser realizado através de ensaios, com ou sem duração determinado. No caso de duração determinada, o levantamento no campo de um *MTBF* de um equipamento até o tempo T, que falhou r vezes, o *MTBF* será dado por:

$$\mathbf{MTBF = T / r} \quad (1)$$

É importante observar que esta fórmula não exclui os tempos de reparos. Segundo MIRSHAWKA e OLMEDO (1993, p. 254) seria um erro aceitável visto que geralmente os tempos de reparo são pequenos quando comparados aos tempos entre paradas. Entretanto, por ser uma estimativa do *MTBF*, os limites inferior e superior de confiança para um nível de confiança com risco α , calculado via distribuição qui-quadrado para o caso de ensaio com duração determinada será dada por (BERGAMO FILHO, 1997, p. 35):

$$\mathbf{- \text{limite inferior} = 2T / \chi^2_{\alpha/2; 2r+2}} \quad (2)$$

$$\mathbf{- \text{limite superior} = 2T / \chi^2_{1-\alpha/2; 2r}} \quad (3)$$

- b) Tempo Médio Até Falhar (*MTTF - Mean Time To Failure*)- Utilizado, na sua grande maioria, em produtos ou equipamentos em que a recuperação da sua função não é possível. Por isso, é importante conhecer o tempo que transcorre até a sua primeira e última falhas. Para os produtos ou equipamentos reparáveis, em alguns momentos, é interessante conhecer o tempo médio até a primeira falha.

- c) Taxa de Falhas – Indica a velocidade de ocorrência de falhas. Quando o equipamento se encontra na sua fase adulta, ou seja, a taxa de falhas se mantém constante, pode-se definir a taxa de falhas como o inverso do *MTBF* (MIRSHAWKA, OLMEDO; 1993, p. 253; BERGAMO FILHO; 1997, p. 13).
- d) Tempo Médio Até Reparar – (*MTTR - Mean Time To Repair*)- Importante indicador da Manutenibilidade de um equipamento. Mede o tempo médio de recuperação do equipamento. Um indicador relacionado com a interrupção do estado operacional de um sistema é a Taxa de Reparo, a qual é o inverso do *MTTR*.

2.4.3. Disponibilidade

A Disponibilidade mede o grau em que a produção está pronta para funcionar (SLACK et al., 1999, p. 484). Mede a extensão de tempo que o consumidor pode utilizar o produto quando desejar, ou seja, o produto no seu estado operativo. Este seria o somatório do tempo no uso ativo mais o tempo em que o produto aguarda para ser utilizado.

A fim de conhecer o estado operativo, deve-se definir os diferentes tempos envolvidos durante a produção para visualizarmos a disponibilidade. Segundo MIRSHAWKA e OLMEDO (1993, p 366), os tempos são definidos como segue abaixo e resumidos na figura 6.

- a) Tempo Total – é o tempo de referência escolhido para análise. Normalmente é o horário de produção de uma fábrica, como exemplo, 44 horas semanais de um turno de trabalho.
- b) Tempo Requerido – é o período dentro do tempo total no qual a instalação estará requisitada para cumprir com a sua função. Para uma indústria de manufatura, por exemplo, subtrai-se do tempo total o período de almoço e pausas dos funcionários, o que normalmente totaliza 1 hora por dia.

- c) Tempo Efetivo de Disponibilidade – é a parte do tempo requerido onde a instalação está efetivamente capaz de cumprir com a sua função requisitada supondo que o fornecimento dos meios externos necessários para seu funcionamento esteja assegurado. Portanto, é o tempo onde não ocorrem paradas.
- d) Tempo de Funcionamento – é a parte do tempo efetivo de disponibilidade onde a instalação está realmente cumprindo com a sua função requisitada. Neste tempo, não está considerado o tempo de espera para um equipamento reiniciar a sua operação quando seu funcionamento foi degradado.
- e) Tempo Efetivo de Indisponibilidade ou de Parada – é o período onde a instalação está incapaz de produzir devido a uma causa interna ou externa. São as paradas da instalação.
- f) Tempo Propriamente Dito de Indisponibilidade ou Parada Própria- é o período de parada cuja causa pertence ao perímetro do meio de fabricação. A causa deste tipo de parada pode ser defeito ou pane do ferramental, das instalações, do produto, paradas funcionais tais como problemas de qualidade, controle de qualidade (execução dos procedimentos de qualidade – autocontrole, tratamento de produto não conforme, etc.), regulagem do equipamento, troca de ferramentas, além da manutenção dos equipamentos, entre outros.
- g) Tempo de Indisponibilidade Exterior ou Parada Induzida – é o tempo de parada cuja causa é externa ao meio de fabricação. A causa deste tipo de pane pode ser parada de linha causada por anomalias no processo subsequente, falta de mão-de-obra, energia, peças, recursos exteriores, e outros.

A Disponibilidade (A) pode ser calculada através dos tempos de manutenção (MIRSHAWKA, OLMEDO, 1993, p. 62),

$A = \text{Tempo Efetivo de Disponibilidade} / \text{Tempo Requerido}$

Uma estimativa pode ser feita quando conhecidos os parâmetros da Confiabilidade (MIRSHAWKA, OLMEDO, 1993, p. 255; BERGAMO FILHO, 1997, p. 4):

$$A = MTBF / (MTBF + MTTR) \quad (4)$$

FIGURA 6 - DIVISÃO DOS TEMPOS DE MANUTENÇÃO



Pode-se compreender tais indicadores através de um exemplo. Um ensaio com duração determinada de 100 horas encontrou 5 falhas num equipamento. Sabendo que o tempo médio de reparo (*MTTR*) é de 5 horas, então pela equação (1), calcula-se o *MTBF*:

$$MTBF = T/r = 100/5 = 20 \text{ horas}$$

Logo, a disponibilidade é determinada pela equação (4):

$$A = 20/(20+5) = 0,8 \text{ ou } 80\%.$$

Portanto, este equipamento está somente 80% do seu tempo disponível para utilização.

2.4.4 Manutenção

Segundo MIRSHAWKA e OLMEDO (1993, p. 3), a função Manutenção pode ser definida como o conjunto de ações que permitam manter ou restabelecer um bem dentro de um estado específico ou como medida para assegurar um determinado serviço.

A função Manutenção pode ser decomposta em quatro tipos de manutenção:

- a) Manutenção Preventiva – É aquela efetuada segundo critérios pré-definidos com o intuito de diminuir a probabilidade de falha ou degradação de um produto ou equipamento que não podem ser detectadas antecipadamente ou se for imposta pelas exigências da produção ou segurança. A obedece a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo (PINTO, XAVIER, 1998).
- b) Manutenção Preditiva – É aquela efetuada somente quando o produto ou equipamento está realmente precisando. Para isso, são realizadas medições a fim de avaliar as suas condições de operação e compará-las com os valores mínimos conhecidos, no qual, se estiver abaixo, falhas potenciais podem acontecer. O controle preditivo de manutenção permite determinar o melhor momento para executar a manutenção preventiva num equipamento, ou seja, o ponto a partir do qual a probabilidade do equipamento falhar assume valores indesejáveis (TAVARES, 1996).
- c) Manutenção Corretiva- É aquela efetuada para recuperar as funções de um produto ou equipamento para as condições especificadas quando o mesmo falha ou cai abaixo de um nível aceitável quando em operação. É aquela em que os consertos e reformas são realizados quando o objeto, máquina, equipamento ou veículo já se encontram quebrados (WYREBSKI, 1997).
- d) Manutenção de Melhoramento – É aquela efetuada a fim de eliminar as falhas que venham necessitar de manutenção (MIRSHAWKA, OLMEDO, 1993, p. 9). Para isso, são introduzidas modificações no projeto.

De acordo com PINTO e XAVIER (1998), as ferramentas que permitem a aplicação dos tipos de manutenção existentes são a Manutenção Produtiva Total (TPM) e a Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM).

2.4.4 Manutenção Produtiva Total

A Manutenção Produtiva Total (*Total Productive Maintenance* – TPM) surgiu no Japão nos anos 70, partir da necessidade de desenvolver técnicas e procedimentos da Manutenção Corretiva, Preventiva e Preditiva. Segundo NAKAJIMA (1989, p. 34), “somente a manutenção preventiva não é suficiente para a conquista da Quebra e Falha Zero. Haveria a necessidade de integração dos setores de engenharia das máquinas, do processo e da produção para concretização deste esforço em conjunto. A Manutenção Produtiva Total seria a proposta para esta questão”. O TPM então, constitui-se da manutenção conduzida com a participação de todos, com o objetivo de maximizar o rendimento operacional das máquinas e equipamentos, e motivar os trabalhadores através de trabalhos em grupo.

Entretanto, o TPM evoluiu ao passar dos anos e, segundo o próprio *Japanese Institute of Plant Maintenance* – JIPM – (NETO, 2001), o foco atual estaria na Gestão da Performance Total. Esta performance não significa obrigatoriamente o maior volume de produção, mas uma integração entre qualidade, custo, prazo de entrega, associados a uma ambiente saudável e segurança do trabalho e melhoria do processo operacional, ou seja, tudo que favoreça a realização de um bom produto.

NAKAJIMA (1988, p. 34) afirma que uma visão abrangente da TPM deve considerar todos os períodos da vida útil do equipamento necessitando, então, da participação de todos os departamentos envolvidos no processo. Com intuito de preservar e alongar a vida útil dos equipamentos, a Manutenção Produtiva Total visa um gerenciamento de perdas no chão de fábrica. A figura 7 mostra as perdas do TPM, as quais deve ser eliminadas ou minimizadas.

Dentre estas perdas, o método japonês distingue seis fontes essenciais de diminuição de rendimento nas instalações industriais (JIPM, 1999; NAKAJIMA, 1988, p. 16):

- a) Perdas por quebra de equipamento;
- b) Perdas por ajustagens nas preparações;
- c) Perdas nas paradas curtas e freqüentes ou tempo morto;
- d) Perdas por operações abaixo da velocidade nominal;

- e) Perdas decorrentes para entrada em regime, decorrentes da instabilidade no início da produção;
- f) Perdas provenientes de peças defeituosas e retrabalhos.

FIGURA 7 - PERDAS NA MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL

Equipamentos	Pessoal	Material e Energia
1- Falhas	9- Gerenciamento	14- Rendimento
2- <i>Set-up</i>	10- Know-how	15- Energia
3- Troca de ferramentas	11- Organização	16- Ferramentas
4- Partida	12- Logística	
5- Microparas e Marcha à vazio	13- Medições e ajustes	
6- Subvelocidade		
7- Defeitos e retrabalhos		
8- Paradas programadas		

FONTE: JIPM, 1999.

O Rendimento Operacional Global (ROG) é um indicador que surgiu para administrar as grandes perdas do TPM de uma instalação. Segundo MIRSHAWKA e OLMEDO (1993, p. 62), este indicador é calculado pela multiplicação de três fatores: a disponibilidade, o desempenho e o índice de qualidade. A disponibilidade será avaliada em função dos tempos de parada da instalação. O desempenho em função da instalação respeitar o tempo de ciclo teórico e, finalmente, o índice de qualidade é avaliado em função da instalação fabricar bem da primeira vez, sem retrabalhos, e principalmente, sem gerar sucatas. Podemos ainda considerar neste último, a perda que o processo leva para se estabilizar.

ANTUNES JUNIOR (2001) adiciona à visão de NAKAJIMA (1988) dois pontos importantes. Primeiro, “a TPM é central para o Sistema Toyota de Produção

na medida em que, quanto menor for a quantidade de estoques existentes entre as máquinas, maior a necessidade de garantir a continuidade das máquinas para que o sistema alcance o desempenho econômico projetado”. Portanto, é necessário elevar a confiabilidade das máquinas para que o fluxo de produção não seja perturbado e, um fluxo sem perturbações, não necessita de estoques intermediários. Pode-se perceber o envolvimento entre as duas filosofias avaliando as suas linhas de ação.

Ainda segundo o autor, um dos conceitos chaves do STP (MONDEN, 1984) é a autonomia que são dispositivos que param as máquinas caso seja percebido alguma anormalidade. Tal conceito exige que ações imediatas e definitivas sejam implantadas a fim de reduzir e eliminar tais paradas de máquinas. Portanto, a autonomia permite, além de impedir a fabricação de produtos defeituosos (MONDEN, 1984), melhorar a confiabilidade dos equipamentos a médio e longo prazo. Como no STP os estoques de material em trabalho são baixos, há pouco tempo para solucionar os problemas de manutenção das máquinas com risco de afetar a sincronização da produção. Além disso, exige-se que a solução deva ser confiável, pois o único momento que o sistema permite que se pare a produção é aquele que garanta que o mesmo não volte a acontecer (SHINGO, 1996).

Já com o gerenciamento das perdas do TPM, na medida em que são reduzidas, caminha-se para manutenção dos padrões operacionais estabelecidos. De acordo com ANTUNES JUNIOR (2001) quando se reduz as perdas devido aos ajustes e ao *setup*, caminha-se na direção da produção com Estoque-Zero, reduzindo-se os tamanhos de lotes adotados, seguindo-se os padrões operacionais estabelecidos e, via a adoção de sinais visuais (*Andon*) torna-se necessário a solução rápida dos problemas. Quando se reduz as perdas por pequenas paradas e por redução de velocidade, os padrões operacionais são mantidos. Quando se reduz as perdas por defeitos, eliminam-se os defeitos de fabricação e também são mantidos os padrões operacionais. Quando se reduz as perdas por retrabalho, os defeitos são eliminados.

Pode-se perceber que num dos conceitos-chave do STP, para conseguir a melhoria do sistema de produção, são desencadeadas ações que terminam com pequenas melhorias nos equipamentos. Contudo no TPM, através de melhorias nas máquinas, eleva-se a confiabilidade das mesmas e dentre elas, as máquinas

críticas, que acabarão por melhorar o rendimento do sistema de produção como um todo.

O segundo ponto que ANTUNES JUNIOR (2001) adiciona é que uma interessante interpretação da TPM consiste em visualizá-la a partir de uma ótica análoga aos ciclos gerenciais do TQC/TQM. Os ciclos de rotina de manutenção devem ser dominados tecnologicamente pelos operadores de máquinas com o auxílio restrito de profissionais ligados diretamente à manutenção. Com isso, é poupado um tempo precioso pelos profissionais de manutenção, que passam a ser responsáveis centrais pelas melhorias contínuas nas máquinas e processos e, assim, as chefias e os engenheiros de manutenção, ficam responsáveis pelo desenvolvimento de novos projetos de máquinas que facilitem a manutenção e pelo Planejamento Global da Manutenção.

Além da sua forte relação com o STP, o TPM pode ser conjugado com outros sistemas de gerenciamento da produção, como a Teoria das Restrições.

O TPM visa a gestão das perdas dos equipamentos e, o seu conceito mais moderno vai um pouco mais além, busca a gestão da performance dos equipamentos em conjunto com seu meio ambiente. Entretanto, dentro de um sistema de produção, os esforços de melhoria serão concentrados naqueles equipamentos que causam mais perdas, tratamento básico via diagrama de Pareto. Observando o indicador de acompanhamento do TPM (MIRSHAWKA, OLMEDO, 1993, p. 97), o mais importante é a fabricação de peças conformes. Portanto, os equipamentos que estiverem causando mais perdas serão aqueles que perdem a maior quantidade de peças. Considerando uma linha de produção balanceada, tal fator pode tornar um equipamento isolado como o gargalo do sistema.

Por outro lado, numa linha de produção que não se encontra balanceada, haverá gargalos conhecidos. A teoria das restrições de GOLDRATT e FOX (1989) focaliza as melhorias nas restrições do sistema, ou seja, nos Recursos com Capacidade Restrita. Segundo ANTUNES JUNIOR (2001), o cálculo da disponibilidade não deverá ser utilizado em todas as máquinas, apenas nas máquinas críticas, ou seja, nas RRC's. Desta forma, ações visando aumentar o ROG do RRC serão melhorias de um indicador local. Todavia, estas apontarão melhorias de ganho no sistema como um todo e não serão uma miragem, conforme

GOLDRATT e FOX (1989) definem para melhorias realizadas em recursos que não sejam críticos, ou seja, os não-RRC's.

2.4.5 Manutenção Centrada em Confiabilidade

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM - *Reliability Centred Maintenance*) é uma estratégia de manutenção com origem numa frustração da autoridade federal de aviação americana (FAA) e das companhias aéreas comerciais. Devido a impossibilidade de se controlar a taxa de falha em classes de equipamentos não confiáveis, no conteúdo assim como na frequência das revisões programadas, por pequenas alterações que houvessem. Por consequência, foi criado um grupo de trabalho com representantes destes dois segmentos, para investigar a aptidão da manutenção preventiva (MENDES, 2002).

Segundo NOWLAN e HEAP¹ e MOUBRAY² apud MENDES, a RCM é um processo usado para definir as exigências de manutenção de um bem físico no seu contexto operacional. É uma metodologia estruturada que possibilita um equipamento cumprir as funções e os padrões de performance. Assim sendo, a partir daquilo que o equipamento deve realizar, o RCM mostra às equipes de manutenção e fabricação quais são as rotinas de manutenção necessárias a fim de obter os resultados desejados.

O processo RCM consiste em responder sete questões principais sobre os equipamentos e seus subsistemas:

- a) Quais são as suas funções?
- b) De que forma elas(funções) podem falhar?
- c) O que as fazem falhar?
- d) O que importa se elas falham?
- e) Pode alguma coisa ser feita para predizer ou prevenir a falha?
- f) O que deve-se fazer se não se pode predizer ou prevenir a falha?

¹ NOWLAN, F. S.; HEAP, H. **Reliability Centred Maintenance**. Virginia, 1978.

² MOUBRAY, J. RCM2 – Reliability Centred Maintenance. UK: L. Heinemann, 1991.

3 MODELAGEM DE FLUXOS

3.1 MODELAGEM DE SISTEMAS

O conceito de sistema é amplamente conhecido como o conjunto de elementos ou partes inter-relacionadas (KUMPERA, 1979). Esta coleção de itens e suas relações, são objeto de estudo e interesse para análise e modelagem de sistemas (SOARES, 1990).

Se as características do sistema que está sendo estudado são conhecidas, as suas fronteiras são delimitadas. Tudo que estiver fora dos limites é denominado ambiente. No entanto, conforme citado por KUMPERA (1979), o sistema é composto por um conjunto de elementos ($e_0, e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_j, \dots, e_{nn}$) e um conjunto de relações ($r_{01}, r_{02}, \dots, r_{ij}, r_{nn}$). Os elementos do sistema são identificados como atributos variáveis de objetos, sendo i, j, \dots, n e não o objeto em si. Dentre estes elementos, pelo menos um deles deverá conter o ambiente do sistema (e_0). Vale ressaltar que nunca se está interessado nas relações entre elementos do ambiente do sistema, pois se estivesse interessado nessas relações, designar-se-ia o conjunto pertinente de elementos e suas relações não como ambiente do sistema e sim como o próprio sistema (KLIR; WALACH³ apud KUMPERA, 1979).

De acordo com SLACK et al. (1999, p. 31-36), um sistema de produção recebe recursos a serem transformados, tais como materiais, informações ou consumidores que passam do ambiente para seu sistema, constituindo as entradas. No sentido inverso, tudo que passa para fora do sistema constitui as saídas. A transformação ocorrida no sistema, geralmente é conhecida como ganho (*throughput*).

Os sistemas podem ser classificados por vários métodos diferentes. Pode haver um sistema determinístico, quando há um conjunto de entradas conhecido do

³ KLIR, G.J.; WALLACH, M. **Cybernetic modeling**, Iffe Books, London, 1967.

qual resulta num único conjunto de saídas, ou um sistema probabilístico, quando pelo menos uma das entradas do sistema for aleatória. Os sistemas podem ser abertos, relativamente fechados ou fechados, dependendo do nível de interação com seu ambiente. Podem ser discretos, contínuos ou combinados. O contínuo é o que apresenta entradas contínuas e as interações ocorrem continuamente sobre o tempo e não por pontos como no discreto. Como na prática poucos sistemas são unicamente discretos ou contínuos, então caracterizamos um terceiro tipo de sistema que é a combinação dos outros dois. Além disso, deve-se conhecer se o sistema é estático, quando não possui a variável tempo, ou dinâmico, quando sistema muda ao longo do tempo.

O progresso e a história da engenharia e da ciência estão profundamente relacionados à capacidade do homem de criar e aplicar modelos. A fim de analisar sistemas e conhecer os resultados prováveis ocasionados por mudanças nas suas variáveis, são criados modelos do sistema. Desta forma, a avaliação destes resultados é feita em menor tempo e custo do que a manipulação direta no próprio sistema. Uma cuidadosa concepção do modelo pode reduzir a complexidade, deixando que o analista descubra o importante. SHANNON (1975) define um modelo como a representação de um objeto, sistema, ou idéia em alguma outra forma que não seja a entidade em si. Modelos devem ser usados principalmente quando houver riscos em sistemas industriais complexos. De outra forma, os elementos de um sistema formam um “universo de discurso” (PASK⁴ apud KUMPERA 1979). Este universo poderia ser um modelo matemático elaborado, no qual os nomes dos objetos, atividades ou eventos poderiam estar relacionados por equações complexas, sendo que, dada uma relação, muitas outras podem ser deduzidas.

⁴ PASK, G. **An approach to cybernetics**, Hutchinson & Co. Ltda., London, 1961

3.1.1 Tipos de Modelos

STRACK (1984, cap. 2) classifica os modelos em quatro tipos: físicos, analógicos, matemáticos e de simulação. Os modelos físicos são aqueles que são representados por atributos físicos semelhantes ao que representam (reduções, duplicatas ou qualquer outro equivalente geométrico). Os modelos analógicos são aqueles que nos quais as propriedades do sistema em estudo são representadas por propriedades análogas. Gráficos e substituição analógica de variáveis são empregados neste modelo. O modelo matemático representa simbolicamente os princípios da situação sendo estudada. O mesmo pode ser classificado como analítico, quando se vale de métodos analíticos para resolver o modelo, por exemplo simplificação, ou um modelo numérico quando emprega procedimentos computacionais e as soluções são obtidas de forma iterativa. Neste caso, não é necessário o conhecimento de equações matemáticas que regem o sistema. Finalmente, o modelo de simulação apresenta os elementos e inter-relações do sistema representadas por procedimentos lógicos ou matemáticos. A figura 8 e 9 mostra os níveis de classificação dos tipos de modelos.

Tanto o modelo matemático analítico, assim como o numérico e o modelo de simulação discreta, podem ser divididos em determinísticos ou probabilísticos. Os modelos determinísticos apresentam relações constantes e necessárias para os parâmetros e relações dos sistemas estudados. Sempre que forem fixados os valores das variáveis independentes, valores bem definidos são obtidos para as dependentes. Programação linear, não-linear, dinâmica, cálculo matricial são alguns tipos de modelos matemáticos analíticos determinísticos. Já a integração, derivação numérica e métodos numéricos são modelos numéricos determinísticos. Os modelos probabilísticos ou estocásticos têm associado probabilidades condicionadas às funções de distribuição e variáveis randômicas. Isto caracteriza fenômenos que não apresentam reprodutividade, como os sistemas complexos. Dentre os modelos analíticos probabilísticos, são utilizados a programação estocástica, os modelos de Markov e a Teoria das Filas. O método Monte Carlo (PRADO, 1999, cap. 10) é um tipo de modelo numérico probabilístico.

FIGURA 8 – CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE MODELOS I

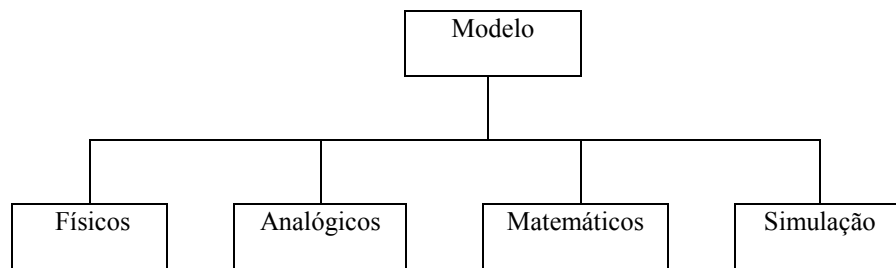
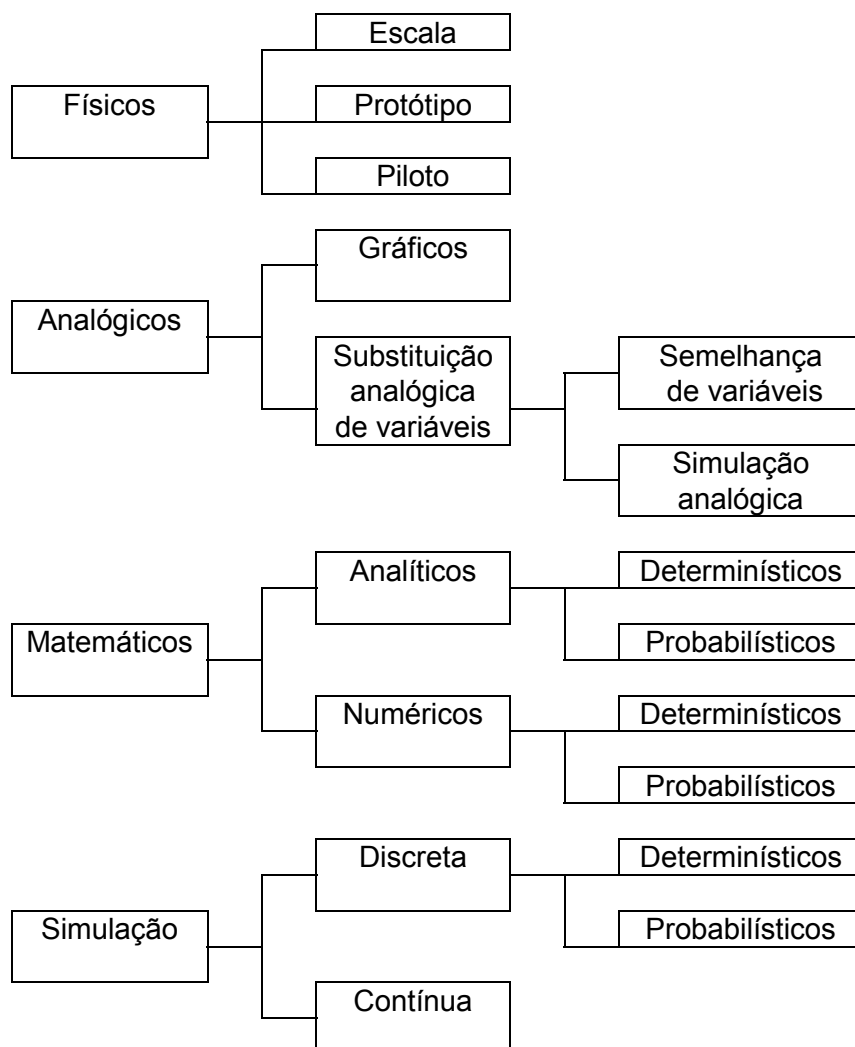


FIGURA 9 – CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE MODELOS II



FONTE: STRACK, 1984, p. 6.

Os modelos de simulação são uma ferramenta que vem sendo amplamente empregada pelas empresas a fim de projetar fluxos e cenários de produção. SCHIMDT e TAYLOR (1970) e CHOI e LEE (2001, p. 669) afirmam que métodos de simulação podem ser usados para auxiliar a análise de um sistema proposto, onde até mesmo os dados de entrada podem ser hipotéticos, além de serem mais fáceis de aplicar que os métodos analíticos. As suas desvantagens são que a sua construção requer treinamento especializado, a qualidade de uma análise depende da qualidade do modelo e da habilidade do modelador. A construção de um modelo é uma arte. Além disso, os resultados de simulação são, às vezes, difíceis de interpretar. A elaboração de um modelo é fatigante para capturar a aleatoriedade do sistema e muitas vezes é trabalhoso para determinar se uma observação feita durante uma rodada é devido a um significativo relacionamento no sistema ou aleatoriedade do modelo. Finalmente, a análise da simulação pode ser de alto custo em tempo e dinheiro. Muitas vezes não se dispõe de suficientes tempo e/ou recursos. Neste caso, uma estimativa que use métodos analíticos é preferível. Estes geralmente necessitam muitas hipóteses simplificadoras para tornarem-se matematicamente manejáveis. Modelos matemáticos são flexíveis, exigem poucos recursos de tempo e custo para seu desenvolvimento e são capazes de dar respostas rápidas. A simulação é ocasionalmente utilizada quando as técnicas analíticas são suficientes.

3.2 TEORIA DAS FILAS

3.2.1 Histórico

Um modelo de um fenômeno para que possa ser o mais realista possível deve levar em conta a possibilidade da aleatoriedade. Isto é, os dados do estudo não podem ser previstos com antecedência, uma vez que ocorrerá uma variação inerente. Esta variação os modelos de probabilidade devem contemplar.

A Teoria das Filas foi desenvolvida para fornecer modelos probabilísticos de avaliação do comportamento de sistemas que tenta prover serviços de surgimento de demanda aleatória. Os problemas de fila de espera consistem em ajustar adequadamente o ritmo de atendimento do processo com o ritmo de chegada do trabalho a ser feito (SHAMBLIN e STEVENS JUNIOR; 1979).

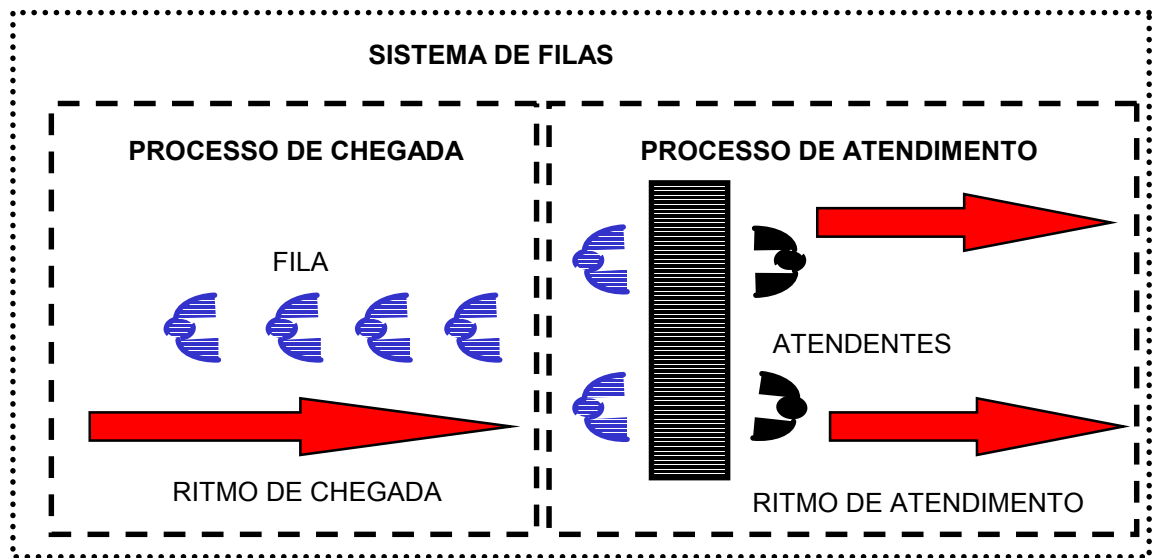
A abordagem matemática das filas se iniciou em 1908, na cidade de Copenhague, Dinamarca. O pioneiro da investigação foi o matemático A.K. Erlang, quando trabalhava numa companhia telefônica, estudando o problema de redimensionamento de centrais telefônicas. Somente a partir da Segunda Guerra Mundial que a teoria foi aplicada a outros problemas de filas (PRADO, 1999, cap 2). Erlang foi também responsável pela noção de equilíbrio estacionário, pela introdução das equações de balanço de um estado e pela primeira consideração da otimização de sistemas de filas (GROSS; HARRIS, 1974). Seu trabalho foi difundido por outros pesquisadores em diversos países europeus. Na década de 30, dentre as pesquisas nesta área, Kolmogorov na Rússia estudava um sistema com entrada de probabilidade de Poisson, saída arbitrária em único ou múltiplo atendente.

3.2.2 Conceitos

Todo processo onde clientes de uma população surgem formando uma fila e que aguardam por um serviço, caracteriza um sistema de Filas (figura 10). A população pode ser a mais variada possível, dependendo do processo que está ocorrendo. Pode ser formada por pessoas, peças de um armazém, o conjunto de telefones de uma cidade, onde originariamente foi desenvolvida a técnica, papéis de um escritório, etc.. Os clientes são a parcela da população que procura o serviço. Os mesmos chegam ao sistema à um ritmo λ e são atendidos à um ritmo μ . O resultado da diferença do ritmo de chegada λ com relação ao ritmo de atendimento μ é a fila. Portanto, a mesma pode ser composta por pessoas no supermercado ou no banco, estoque de peças aguardando algum tipo de processamento num fluxo de produção, programas de computador aguardando espaço de memória para serem

atendidos na Unidade Central de Processamento (UCP), etc.. Para a área de aplicação em estudo, as filas serão compostas por estoques de peças.

FIGURA 10 – PROCESSO DE SISTEMA DE FILAS



Estoque é definido por SLACK et al. (1999, p. 278) como “a acumulação armazenada de recursos materiais em um sistema de transformação”, surgindo exatamente para compensar diferenças de ritmo de fornecimento e demanda. Na indústria de manufatura, o estoque será composto pelos seus recursos materiais, enquanto que numa empresa com operações de serviço tal como um parque temático, o estoque será formado pelos próprios consumidores. Neste caso, para estes autores, quando são consumidores que estão sendo “processados” pelos brinquedos, referem-se a “estoques” como “filas”.

Pulmão é outro termo empregado para fila, porém, conforme definido por LUTZ, DAVIS e SUN (1998, p. 301-316), no caso de uma linha de produção, pulmão é o número de espaços de estocagem de subconjuntos nos diversos estágios de fabricação, excluindo os subconjuntos que estão sendo trabalhados.

3.2.2.1 Características da Fila

Conforme citado por PRADO (1999, cap 2), um sistema de filas é composto, basicamente, por uma população, clientes, ritmo de chegada e atendimento, número de atendentes ou servidores, tamanho médio da fila e sua disciplina.

População é o grupo que fornece clientes. Se houver apenas alguns clientes potenciais, a população será finita. Se houver um número acima de 30 ou 50 clientes potenciais, diz-se que a população é infinita. O pressuposto principal de uma população infinita é quando a população potencial for bastante grande para significar que a chegada de um cliente não afetará essencialmente a probabilidade de outra chegada (SHAMBLIN, STEVENS JUNIOR; 1979). Já o Cliente é a unidade de chegada que requer atendimento.

Ritmo de chegada, representada pela letra grega λ , é a taxa segundo a qual os clientes chegam para serem atendidos. Como é raro um processo aonde o ritmo de chegada é regular, ou seja, não existe nenhuma variação entre os valores para os intervalos entre chegadas, são adotadas distribuições de probabilidade para representar o processo. O pressuposto referente à distribuição de freqüência deste valor tem grande efeito sobre o modelo matemático. O mesmo modelo com distribuição normal pode diferir significativamente em termos de resultado do que com uma distribuição de Poisson.

Ritmo de atendimento, representada pela letra grega μ , é a taxa segundo a qual um canal de atendimento ou servidor pode efetuar o atendimento requerido pelo cliente. Importante ressaltar que o valor desta taxa é considerado como se o servidor estivesse ocupado 100% do seu tempo. Como há tempo ocioso, a distribuição de freqüência deste valor é igualmente importante na determinação do grau de complexidade matemática. O pressuposto mais comum é a distribuição de Poisson, porém exige que os eventos de chegada e atendimento sejam completamente independentes. Em todos os casos, os resultados são valores médios ou esperados e supõe-se que as taxas se mantêm constantes ao longo do tempo. De fato, isto pode não ser verdade, uma vez que podem ocorrer alterações no processo tão logo a fila assuma um valor muito alto.

Para fins de notação de eficiência, GROSS e HARRIS (1974, p 46) definem $\rho = \lambda/\mu$. A razão ρ é chamada de Fator de Utilização do Atendente, o qual representa a fração média do tempo em que o atendente está ocupado e, por

consequente, a fração que estará ocioso, ou seja, sem clientes no sistema. Este fator é a base de cálculo da probabilidade de haver um número K de clientes no sistema, o qual definirá o tamanho e tempo médio que os clientes permanecem na fila e no sistema.

O tamanho médio da fila, representado por L_Q , é a característica mais relevante ao se defrontar com a opção de escolher uma fila. A meta é não ter fila, chegar e ser atendido. Supondo que os ritmos médios de chegada e atendimento sejam constantes, o tamanho da fila irá oscilar em torno de um valor médio (PRADO, 1999, p. 26). O sistema pode ser limitado a um tamanho onde a partir do momento que se encontra saturado, rejeita clientes. Já o número médio de clientes no sistema será representado pela letra L , o qual compreende o tamanho médio na fila mais o número médio de clientes no atendimento.

A partir do número médio de clientes no sistema ou na fila, é possível calcular o tempo médio de permanência do cliente no sistema (W) e na fila (W_Q). Para um sistema estável de filas, J.D.C. Little demonstrou que (PRADO, 1999, p. 38; ROSS, 1997, p. 413) $L = \lambda W$, logo, $L_Q = \lambda W_Q$.

Finalmente, a disciplina da fila é a regra que define qual cliente será o próximo a ser atendido. Normalmente, o primeiro da fila é atendido, ou seja, “primeiro a chegar é o primeiro a ser atendido”, conhecido como Fife (*First In First Out*). Outras disciplinas podem existir tais como “último a chegar, primeiro a ser atendido”, conhecido como Lifo (*Last In First Out*), serviço aleatório, por ordem de prioridade, etc..

3.2.3 Classificação de Filas

A fim de descrever rapidamente uma fila e classifica-la para fins de comparação, KENDALL⁵, citado por GROSS e HARRIS (1974) criou uma notação $A/B/c/K/m/Z$, em que:

- a) A descreve a distribuição dos intervalos entre chegadas;

⁵ KENDALL, D.G., **Stochastic processes occurring in the Theory of Queues and their analysis by the method of imbedded Markov chains**, p. 338-354 Ann. Math. Statist. 24, 1953.

- b) \underline{B} descreve a distribuição do tempo de serviço. As distribuições podem ser do tipo M para Marcoviana ou Poisson, Em para Erlang de estágio m, Hm para Hiper-exponencial para estágio m, D para determinística e G para geral.
- c) \underline{c} é a quantidade de atendentes;
- d) \underline{K} é a capacidade máxima do sistema;
- e) \underline{m} é o tamanho médio da população que fornece clientes;
- f) \underline{Z} é a disciplina da fila.

Existe uma notação condensada $A/B/c$ onde se supõe que não há limite para o tamanho da fila, a população é infinita e a disciplina da fila é FIFO. Para o caso de capacidade limitada, a notação utilizada é $A/B/c/K$.

De acordo com PRADO (1999, cap 5), os modelos marcovianos ou de distribuição de Poisson possuem uma grande aplicação teórica uma vez que permitem desenvolver uma teoria sobre filas. Através dele, é possível calcular todas as principais características da fila, sem necessitar efetuar dimensionamentos e estudos financeiros com base em estudos mais demorados com simulação ou uma abordagem matemática complexa. Modelos de filas com distribuições exponenciais levam a dimensionamento de sistemas com mais segurança (PRADO, 1999, cap 10).

Uma vez que este trabalho busca a modelagem de uma linha de produção de um único atendente e, os tempos associados são considerados exponenciais e determinísticos (discutido no capítulo 4), é apresentado o desenvolvimento do cálculo de clientes no modelo $D/D/1/K-1$ e o cálculo da probabilidade de presença de clientes no sistema do modelo $M/M/1$.

3.2.3.1 Modelo $D/D/1/K-1$

De acordo GROSS e HARRIS (1974, cap. 1), a classe mais simples de modelos de filas é aquela em que nenhuma distribuição de probabilidade é necessária para descrever os modos de chegada e de serviço. Tanto os tempos de chegada assim como os tempos de serviço são pontos conhecidos, ou seja, são

constantes fixas. O modelo de fila que se adequar a esta descrição é chamado de determinístico.

Considera-se o caso de chegadas a uma taxa constante num servidor único que possui uma taxa de atendimento constante, aonde o primeiro cliente que chega é o primeiro a ser atendido (*FIFO*). Assume-se que no momento $t = 0$, não há clientes no sistema. Se λ é o número de chegadas por unidade de tempo, então $1/\lambda$ será o tempo constante entre chegadas. Por analogia, sendo μ a capacidade de atendimento, $1/\mu$ será o tempo de atendimento. Se a taxa de atendimento μ for maior que a taxa de chegadas λ , nunca haverá formação de fila. Entretanto, se $\lambda > \mu$, haverá uma fila que irá aumentar aos poucos. Cada cliente esperaria mais que seu antecessor pelo serviço até, eventualmente, clientes esperassem infinitamente. A fim de prevenir este acontecimento, uma barreira deve ser imposta aos clientes quando um número de clientes no sistema alcançar um certo tamanho K . A entrada deste cliente será rejeitada e o sistema terá no máximo $K-1$ clientes. Considerando uma população infinita, este será o modelo determinístico de fila $D/D/1/K-1$.

Para calcular o número de clientes no sistema no tempo t , ou seja, $n(t)$, assume-se que tão logo é finalizado o serviço de um cliente outro é iniciado. O número de clientes no sistema no tempo t , incluindo aquele no serviço, é determinado pela equação (5) (GROSS, HARRIS, 1974, cap. 1):

$n(t)$ = número de chegadas no intervalo $(0,t)$ – número de atendimentos no intervalo $(0,t)$

$$n(t) = \{t/(1/\lambda)\} - \{[t-(1/\lambda)]/(1/\mu)\}$$

$$n(t) = \lambda t - [\mu t - (\mu/\lambda)]$$

$$\mathbf{n(t) = t (\lambda - \mu) + (\mu/\lambda)} \quad (5)$$

A equação (5) é válida até o sistema começar a rejeitar a entrada de novos clientes. Definindo t_i como sendo o menor tempo necessário para ocorrer a primeira rejeição, ou seja, o sistema atingir a sua capacidade $K-1$, então, aplicando sobre a equação (5):

$$\mathbf{n(t_i) = K = t_i (\lambda - \mu) + (\mu/\lambda)} \quad (6)$$

Desta forma, o sistema não descenderá abaixo de K-2, pois assim que houver uma partida do sistema e atingir K-2, em seguida ocorre uma chegada levando o sistema a sua capacidade K-1.

Para situação onde $\mu > \lambda$ e há K-1 clientes no sistema no momento $t = 0$, definindo t_s como momento em que o sistema se esvaziará, então, este será dado pela equação (7), adaptada da equação (6):

$$n(t_s) = 0 = K - t_s (\lambda - \mu) + (\mu/\lambda) \quad (7)$$

Para tempos superiores a t_s , não haverá mais filas, somente um cliente do atendimento.

3.2.3.2 Modelo M/M/1

O modelo M/M/1 supõe que clientes chegam a um único servidor com distribuição de Poisson ou Exponencial Negativa tendo um ritmo λ . Cada cliente, após a chegada, é atendido diretamente pelo servidor, senão aguarda na fila, a qual respeita a disciplina FIFO. Assim como o ritmo de chegada, o servidor possui um atendimento marcoviano ou de distribuição de Poisson com ritmo μ . Tanto a capacidade da fila assim como da população é infinita.

Um processo $\{x(t), t \in T\}$ será dito marcoviano se $t_1 < t_2 < \dots < t_n$. A equação conhecida como propriedade marcoviana, ou da falta de memória, afirma que o estado futuro depende apenas do “presente” e não da “história passada”, como segue:

$$P(x(t_{n+1}) \leq x_{n+1} / x(t_1) = x_1, x(t_2) = x_2, \dots, x(t_n) = x_n) = P(x(t_{n+1}) \leq x_{n+1} / x(t_n) = x_n)$$

Portanto, todo processo com incrementos independentes é marcoviano. A Cadeia de Markov é um processo marcoviano discreto. Considera-se um sistema que pode estar em um, de um conjunto enumerável de estados. Supondo que o sistema é observado nos tempos $t = 0, 1, 2 \dots$ e denotando n_t o estado do processo no tempo t , então:

$$P(n_{t+1} \leq n_{t+1} / n_1 = n_1, n_2 = n_2, \dots, n_t = n_t) = P(n_{t+1} \leq n_{t+1} / n_t = n_t)$$

ROSS (1997, cap. 8) afirma que, para cada $n \geq 0$, o ritmo no qual o processo entra no estado n é igual ao ritmo no qual ele deixa o estado n . Considerando o estado 0, no qual o processo só pode deixá-lo através de uma chegada uma vez que não pode haver uma partida com o sistema vazio. Sabendo que a taxa de chegada é λ e a proporção de tempo em que o sistema se encontra no estado 0 é P_0 , então a taxa na qual o processo deixa o estado 0 é λP_0 . Por outro lado, o estado 0 pode ser alcançado por uma partida no estado 1. Se existe um único cliente no sistema e completa o serviço, o sistema torna-se vazio. Sabendo que a taxa de atendimento é μ e a proporção de tempo que o sistema tem exatamente um cliente é P_1 , então a taxa na qual o processo entra no estado 0 é μP_1 . Segundo o princípio de ROSS (1997, cap. 8), chega-se a primeira equação: $\lambda P_0 = \mu P_1$.

Considerando o estado 1, o processo pode deixar este estado por uma chegada ou uma partida, portanto a uma taxa $\lambda + \mu$. Sabendo que a proporção de tempo que o processo se encontra no estado 1 é P_1 , a taxa na qual o processo deixa o estado 1 é $(\lambda + \mu)P_1$. Por outro lado, o estado 1 pode ser alcançado por uma chegada no estado 0 ou uma partida no estado 2. Logo, a taxa na qual o processo entra no estado 1 é $\lambda P_0 + \mu P_2$. Estendendo este raciocínio para o restante dos estados, chega-se as seguintes equações, conforme quadro 1:

QUADRO 1 – SISTEMA DE EQUAÇÕES PARA OS ESTADOS NO MODELO M/M/1

ESTADO	TAXA ENTRADA = TAXA SAÍDA
0	$\lambda P_0 = \mu P_1$
$n, n \geq 1$	$(\lambda + \mu)P_n = \lambda P_{n-1} + \mu P_{n+1}$

Resolvendo as equações, encontra-se:

- $P_1 = (\lambda/\mu)P_0$
- $P_{n+1} = (\lambda/\mu)P_n + (P_n - (\lambda/\mu)P_{n-1})$

Em termos de P_0 :

- $P_1 = (\lambda/\mu)P_0$
- $P_{n+1} = (\lambda/\mu)P_n + (P_n - (\lambda/\mu)P_{n-1}) = (\lambda/\mu)P_n = (\lambda/\mu)^{n+1}P_0$. Se $P_{n+1} = (\lambda/\mu)^{n+1}P_0$, logo:

$$P_n = (\lambda/\mu)^n P_0. \quad (8)$$

Para determinar P_0 , sabe-se que a soma das probabilidades é igual a 1.

Logo:

$$1 = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} (\lambda/\mu)^n P_0 = 1 \rightarrow P_0/(1-\lambda/\mu) = 1 \rightarrow P_0 = 1 - (\lambda/\mu) \quad (9)$$

Substituindo, então, (9) em (8) e fazendo $\rho = \lambda/\mu$, tem-se que a equação para calcular a probabilidade de haver n elementos no sistema é, para $n \geq 1$ e $\rho < 1$, para que a fila não aumente infinitamente:

$$P_n = \rho^n (1 - \rho) \quad (10)$$

4 CONSTRUÇÃO DO MODELO

4.1 UNIVERSO DA PESQUISA

Primeiramente, a criação do modelo passa pela apresentação das características do sistema no qual o mesmo poderá ser empregado.

O sistema é caracterizado por arranjo-físico em linha, ou seja, postos de trabalho alinhados aonde o produto vai sendo montado a medida que avança na linha. O produto obrigatoriamente precisa passar por todos os postos. Não há redundância de postos, ou seja, não há postos reservas para substituição dos titulares em caso de problemas na linha. Ao final da operação do último posto, o produto está terminado. O lote de transferência é unitário. Os postos de trabalho são de operações de manufatura, isto é, cada posto possui uma seqüência de operações a serem realizadas, aonde o ritmo e a habilidade do operário influencia diretamente no tempo de operação. Esta seqüência de operações contempla o abastecimento de peças num meio de produção, a agregação de valor sobre o subconjunto e, finalmente, o desabastecimento do subconjunto do posto.

Existe uma produção a ser realizada para atender a demanda, com um objetivo diário para fins de direcionamento. Se há uma menor produção em um dia, deve-se compensar esta perda ao longo dos outros dias. Portanto, há uma meta de produção diária a ser atingida dentro de um tempo estabelecido. Este tempo estabelecido, por analogia, é o tempo de abertura para cálculo da disponibilidade. Logo, há um tempo disponível para produção e para paradas, sejam paradas próprias ou induzidas.

Dentro do tempo de paradas próprias, é obrigatório uma margem para paradas funcionais, ou seja, para troca de ferramentas e manutenção preventiva de primeiro nível do posto de trabalho. A troca de ferramentas ocorre após um número de ciclos realizado, quando é necessário trocar devido ao desgaste da mesma. Já no caso da automanutenção, NAKAJIMA (1989, p. 64) afirma que “na etapa da

elaboração dos padrões de limpeza e de lubrificação quando da implementação da manutenção autônoma, as tarefas de cunho diário que são realizadas pela produção devem perdurar no máximo por 10 minutos, no início ou no final do turno de produção”. A mesma condição é aplicável neste estudo, sendo que a sua execução está condicionada a não ocorrência de falhas na linha de produção durante o turno de trabalho.

É reservado dentro do tempo de paradas próprias, uma margem de tempo para realizar possíveis manutenções corretivas. Logo, os meios produtivos são sujeitos a falhas com taxas de quebra diferenciadas. Todavia, a manutenção corretiva só é executada quando o meio produtivo não está em condições de uso.

Em ambos os casos, as paradas funcionais ou quebras de equipamentos, há um atendente para repor o equipamento em serviço. No caso de troca de ferramentas e manutenção autônoma, é o próprio operário do posto que a executa. No caso de quebras, há mantenedores especializados para atender os equipamentos. Quando mais de um equipamento falha, um segundo mantenedor deve repor o equipamento na sua condição de uso. A manutenção de melhoramento, a preditiva e parte da preventiva são executadas fora do horário de produção.

Além das paradas próprias, há também tempo para paradas induzidas. Na parada induzida, o posto pára por falta de matéria-prima, o qual pode ser o subconjunto do posto precedente, e também pára quando o estoque intermediário ao posto sucedente se encontra no máximo.

Os postos são balanceados para um tempo de ciclo objetivo, isto é, será o tempo disponível dividido pela produção diária. Deste modo, o número de operários alocados em cada posto de trabalho será uma condição para que nenhum posto ultrapasse o tempo de ciclo objetivo. Como resultado, haverá postos de trabalho com tempos de ciclo diferenciados, porém balanceados a um certo limite. Isto ocorre uma vez que a taxa de ocupação dos operários deve se equivaler. Vale ressaltar que haverá um posto gargalo no sistema o qual será a combinação de um tempo de ciclo alto com uma baixa disponibilidade do equipamento neste mesmo posto.

Como existem diferenças nos tempos de ciclo dos postos, além de disponibilidades, são necessários estoques intermediários para absorver estas diferenças de ritmo de chegada e atendimento em cada posto. Portanto, percebe-se o processo de formação de filas entre os postos. No estudo em questão, será empregado o termo pulmão para denominar a fila que é formada entre os postos de trabalho.

Estes pulmões entre os postos, importantes para absorver as variações estocásticas, influenciam na produtividade dos operários. Isto ocorre devido o deslocamento dos mesmos até o pulmão, além da manipulação realizada, para linhas onde não há transportadores, tais como esteiras, etc.. Nas linhas com transportadores, existe a necessidade de espaço na linha para os mesmos. Por isso, é importante haver o mínimo necessário de pulmão em linha.

A fim de minimizar estes pulmões, será desenvolvido um modelo matemático numérico probabilístico, baseado na Teoria das Filas, na visão de gargalos da Teoria das Restrições e respeitando os princípios de Produção Enxuta. PRADO (1999, p. 16) afirma que “para dimensionar adequadamente um sistema devemos dedicar especial atenção aos gargalos, ou seja, pontos que ocorrem filas”. Nem todos os pontos que ocorrem filas são gargalos, entretanto, é uma indicação visual de uma falta de sincronismo entre os ritmos de chegada e atendimento.

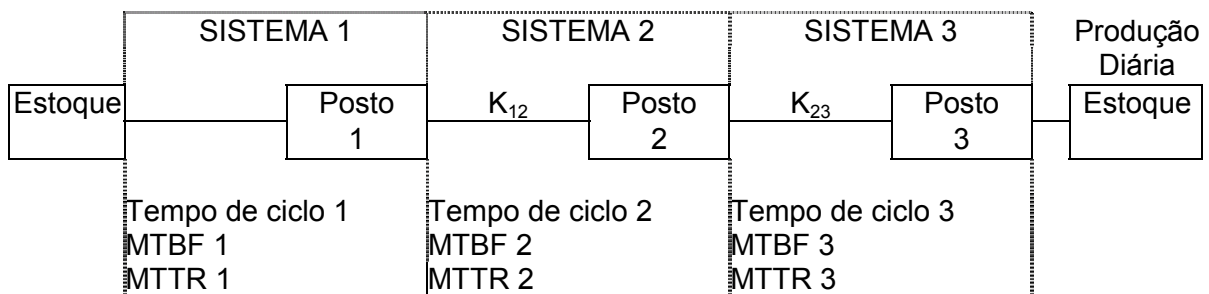
O objetivo do modelo será o cálculo da mínima capacidade de pulmões entre postos não balanceados, sujeitos à paradas, a fim de se alcançar a produção desejada.

4.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO

Todo modelo é uma abstração de um sistema. Como o objetivo é desenvolver uma ferramenta rápida de análise, que possa ser usada num *software* de uso comum entre as empresas, o sistema deve ser simplificado a fim de evitar complexidades matemáticas do modelo analítico. A figura 11 mostra um esquema com a quantidade mínima de postos de trabalho numa linha de produção para o

modelo proposto. O posto 1 é aquele por onde os insumos entram na linha de produção. O posto 2 é um posto característico de meio de linha. Já o posto 3 é aquele por onde o produto é acabado e deixa a linha de produção. As simplificações feitas para o sistema em estudo seguem abaixo:

FIGURA 11 - ESQUEMA DE CONFIGURAÇÃO MÍNIMA DE POSTOS DE TRABALHO



4.2.1 Ciclo de produção dos postos de trabalho

A montagem do modelo se inicia exatamente pela consideração de qual distribuição se adequa na execução do ciclo de operações dos postos de trabalho. A cada ciclo o operário deve executar uma seqüência de tarefas, respeitando em muitas vezes, uma série de movimentos. Para muitos destes movimentos, os tempos são tabelados e conhecidos pelas técnicas de cronoanálise. Desta forma, um ciclo de movimentos possui um tempo padrão, havendo variação em torno deste tempo somente pela influência da habilidade e do ritmo do operário. Logo, a hipótese que pode ser levantada é uma distribuição aproximadamente normal, com a média próxima ao tempo padrão. A fim de comprovar esta hipótese foram medidos 50 ciclos de um posto com as características do modelo. O gráfico 1 mostra o histograma das 50 medições, onde a média amostral \bar{x} foi de 1,74 min com um desvio-padrão amostral σ de 0,05 min. Nota-se uma maior freqüência dos resultados na faixa compreendida entre 1,69 e 1,83 min, próximo à média. A tabela 1 mostra a freqüência relativa de ocorrências nos intervalos $[\bar{x}-\sigma, \bar{x}+\sigma]$, $[\bar{x}-2\sigma, \bar{x}+2\sigma]$ e $[\bar{x}-3\sigma, \bar{x}+3\sigma]$.

$x+3\sigma]$, os quais representam 68,27%, 95,45% e 99,73% da população (SPIEGEL, 1978, p. 158). Para esta amostra, pode-se perceber que a distribuição de probabilidade se aproxima da normal, onde os valores encontrados foram 72%, 96% e 100%.

GRÁFICO 1 – HISTOGRAMA DA VARIAÇÃO DO TEMPO DE CICLO

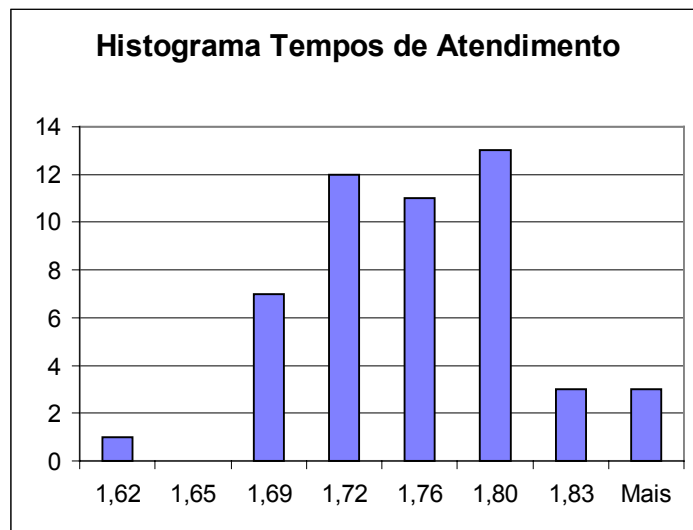


TABELA 1 – FREQUÊNCIA RELATIVA DOS TEMPOS DE PROCESSAMENTO

INTERVALO	PERCENTUAL DA POPULAÇÃO	FREQUÊNCIA RELATIVA
1,69 -- 1,79	68,27%	72%
1,64 -- 1,84	95,45%	96%
1,59 -- 1,89	99,73%	100%

Foi realizado um teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO, WILK, 1965) com 5% de significância (α). As hipóteses do teste são:

- a) H_0 : Não há evidências para afirmar que os dados não seguem uma distribuição normal;
- b) H_1 : Há evidências para afirmar que os dados não seguem uma distribuição normal.

O p-valor encontrado foi de 0,232, ou seja, maior que 0,05. Portanto, pode-se afirmar que neste nível de significância os dados seguem uma distribuição normal, ou seja, não rejeita H_0 .

Entretanto, na literatura sobre modelos probabilísticos com teoria das filas (GROSS, HARRIS, 1974; ROSS, 1997, cáp. 8) há um desenvolvimento apenas teórico de modelos de filas com distribuições gerais. Diversos autores citam a complexidade matemática que o desenvolvimento de equações de probabilidade de presença de clientes no sistema provocaria, seja sistemas com capacidade finita ou não. Por isso, toda a teoria é baseada na distribuição exponencial devido a sua propriedade marcoviana. Logo, não há um cálculo da quantidade de clientes ou de probabilidade da sua presença para distribuição normal ou qualquer outra. Isto requer um desenvolvimento à parte, o qual poderia levar a complicadas equações matemáticas. Uma vez que a complexidade não é o escopo de trabalho, o interesse sobre o tempo de ciclo se dá para fins de determinação do tempo necessário para realizar a produção, então será adotado que a fila que se forma entre os postos de trabalho é de um modelo determinístico. Os tempos de processamento mais lentos ou mais rápidos acabam se compensando ao longo do tempo, em torno do valor médio. Portanto, o tempo de ciclo médio será um tempo determinístico para o cálculo do pulmão.

4.2.2 Falhas nos equipamentos

Conforme figura 5 no item 2.4.1 (NAKAJIMA, 1989, p. 35), observa-se a variação das taxas médias de falhas ao longo do ciclo de vida. Nota-se que as taxas médias de falhas variam nas fases de infância e velhice e, somente na fase de estabilidade que as taxas médias permanecem constantes. O modelo proposto considera exatamente um sistema estável, ou seja, sem variação das taxas médias de falhas. Deste modo, a probabilidade de falha também permanece em torno de um valor médio. Com esta simplificação, a previsão da disponibilidade do equipamento se torna mais confiável e, assim, pode ser considerado no modelo.

Como observação, para fins de cálculo do *MTBF* e do *MTTR*, as paradas funcionais e o tempo de execução das mesmas são consideradas como falhas, quando executadas dentro do período do tempo requerido. O mais importante é realmente conhecer a fração de tempo em que o equipamento está parado, seja por falhas inesperadas, seja por paradas programadas.

Mesmo sabendo que as paradas programadas ocorrem após um número determinado de ciclos ou tempo de produção, indicando uma distribuição de probabilidade normal, a distribuição adotada é a exponencial. Como os equipamentos são susceptíveis a uma taxa de falhas constante, então, conforme BERGAMO FILHO (1997, p. 12) afirma: “quando a taxa de falhas for constante, a distribuição entre falhas é exponencial”.

4.2.3 Funcionamento em caso de problemas de qualidade

Em toda linha de produção com operações de manufatura, a ocorrência de problemas por defeitos de peças, erro de operação, má regulação dos meios produtivos, entre outros, de certo modo é considerada normal. O que difere é a forma de tratar as causas e os retrabalhos de tais problemas. Para o modelo proposto, apenas a forma de tratar os retrabalhos é relevante, pois pode ou não interferir no fluxo de produção.

Diversas soluções são aplicadas para retrabalho de linha. A primeira opção seria, obviamente, o retrabalho realizado pelo próprio operário no posto. Somente peças conformes seguiriam no fluxo produtivo. Esta opção estaria estreitamente relacionada com os recursos necessários para realizar o retrabalho, o tempo médio de retrabalho, a flexibilidade da linha em recuperar este tempo e o nível de integração da linha.

Caso o retrabalho requeira máquinas e ferramentas especiais para ser realizado, geralmente o retrabalho é realizado em outro local, que não o posto. O mesmo princípio se aplica se o tempo de retrabalho é muito longo e não há flexibilidade para recuperar este tempo, devido a integração da linha.

As linhas de produção mais integradas, onde não há possibilidade de retirada da peça defeituosa do fluxo e o retrabalho no posto causa a parada de toda linha, devem buscar alternativas para compensar esta falta de flexibilidade. Uma alternativa seria a utilização de um posto de retrabalho ao final da linha de produção. O defeito seria indicado em algum sistema de informação onde retocadores fariam a leitura desta indicação e retrabalhariam o defeito. Outra solução possível para este caso seria manter um operador reserva para uma certa quantidade de postos. Quando do surgimento de uma dificuldade em algum posto, através de um sistema de chamada (*Andon*, por exemplo), o operador reserva viria ajudar o posto em dificuldade. Normalmente, este operador reserva é o mais experiente na atividade executada pelo conjunto de postos designados na linha de produção. O mesmo poderia ajudar com orientações ao operador em dificuldade ou executar sozinho a finalização ou o retrabalho da operação. Em ambos os casos, o objetivo é não causar parada do fluxo produtivo, ou seja, manter um fluxo contínuo.

Este sistema com operador reserva também é aplicável para linhas de produção onde é possível a retirada do subconjunto defeituoso para retrabalho. Caso surja o defeito, através também de um dispositivo sinalizador, o operador reserva é chamado ao posto. O mesmo retiraria a peça, retrabalharia imediatamente e retornaria o subconjunto ao fluxo produtivo no mesmo ponto aonde foi retirada.

Para o modelo proposto, considera-se que os tempos de retrabalho de defeitos de qualidade que, porventura ocorram nos postos de trabalho, estão inseridos dentro deste último contexto. Há um operador reserva que retrabalha os subconjuntos e os insere no ponto aonde foi retirado. Desta forma, o número de clientes transferindo-se de um sistema para outro não será afetado, contanto que o tempo de retrabalho não seja superior ao *MTBF* do equipamento. Além disso, mantém a condição que o posto só pára por paradas induzidas ou por *setup* e manutenção corretiva e preventiva. Para o caso em que não haja o operador reserva, deve ser considerado o tempo de retrabalho e a ocorrência dos mesmos como uma parada.

Finalmente, deve ser considerado a geração de sucatas na linha de produção, sejam subconjuntos ou produtos acabados. Logo, o índice de qualidade

dos postos deve ser considerado, através de um levantamento do histórico em cada posto de trabalho.

4.2.4 Funcionamento do fluxo de produção dos postos de trabalho

A linha começa no sistema 1. Este sistema possui um posto com características próprias uma vez que é a entrada das matérias-primas da linha. O mesmo é circundado pelo pulmão K_{12} , o qual pertence ao sistema 2, e pelo estoque das matérias-primas, que será a sua própria fila. Para o mesmo, considera-se que não há desabastecimento. O ritmo de chegada das matérias-primas é infinitamente maior que o ritmo de atendimento μ_1 . Esta é a primeira consideração a ser feita e a primeira simplificação. O risco de desabastecimento deste posto existe em qualquer empresa, entretanto, é uma contingência que deve ser tratada a parte. Esta ocorrência deve ser feita muito ocasionalmente, caso contrário, não será possível haver um fluxo de produção contínuo e estável nos postos de trabalho.

Este posto está sujeito à falhas e bloqueio causado pelo posto posterior, ou seja, caso o pulmão K_{12} atinja a sua capacidade máxima e o trabalho esteja finalizado no posto 1, este deverá aguardar a abertura de uma vaga no pulmão para retornar a operar. O pulmão K_{12} irá atingir a sua capacidade máxima em duas situações:

- a) Quando o tempo de ciclo do posto 1 for menor que o tempo de ciclo do posto 2 ($t_{c1} < t_{c2}$) e o posto 1 não parar antes de t_i (GROSS, HARRIS, 1974, cap. 1), tempo este definido no item 3.2.3.1 desta dissertação. Vale ressaltar que, se $t_{c1} > t_{c2}$, o pulmão tende a esvaziar ao longo do tempo ao invés de encher-se;
- b) Quando o posto 2 parar e não retornar à operação antes do posto 1 completar o pulmão.

O posto do sistema 2 é um posto característico de meio de linha. É circundado pelo seu pulmão K_{12} , que é a fila do seu sistema, e pelo pulmão K_{23} , fila

do sistema 3. Assim como o posto 1, está sujeito à falhas e bloqueio do pulmão K_{23} , portanto, todas as considerações para K_{12} alcançar a sua capacidade máxima servem para K_{23} . Além deste evento, este posto está sujeito a desabastecimento do posto 1, ou seja, a um período de ociosidade. Esta ociosidade ocorrerá quando o seu pulmão esvaziar. O pulmão K_{12} irá se esvaziar em duas situações:

- a) Quando o tempo de ciclo do posto 2 for menor que o tempo de ciclo do posto 1 ($t_{c2} < t_{c1}$) e o posto 2 não parar antes de t_s , na equação 7, item 3.2.3.1 desta dissertação. Vale também ressaltar que, se $t_{c2} > t_{c1}$, o pulmão tende a atingir a sua capacidade máxima ao longo do tempo e não se esvaziar;
- b) Quando o posto 1 parar e não retornar à operação antes do posto 2 esvaziar o pulmão.

Finalmente, o sistema 3 possui características distintas dos outros dois sistemas. É o final de linha, circundado pelo pulmão K_{23} , a sua própria fila, e pelo estoque de produtos acabados. Assim como no caso de desabastecimento no posto 1, onde não é considerado este evento, o posto de final de linha não sofre bloqueio do estoque de produtos acabados. Portanto, este posto está sujeito somente a falhas e a desabastecimento do posto 2. Logo, as mesmas considerações de ociosidade do posto no sistema 2. Em todos os casos, a transferência de lote é unitária.

Entende-se que a saturação e a ociosidade são tempos de parada induzida que causam perdas de produção, uma vez que o posto está disponível para produzir e fica impossibilitado por motivos externos. Entretanto, segundo os princípios da teoria da restrição, o fluxo deve ser balanceado e não a capacidade das máquinas. A ênfase está no fluxo de materiais e não na capacidade dos recursos. A utilização de um recurso não-gargalo não é determinada pela sua disponibilidade, mas pela restrição do sistema. Os recursos devem ser utilizados na sua capacidade para que impliquem na contribuição aos objetivos do OPT.

Por isso, um posto de trabalho está sujeito à ociosidade e saturação. Isto pode ocorrer em duas situações conforme citado anteriormente: por diferença de

tempo de ciclo ou por parada de um posto vizinho. A ociosidade ou a saturação que ocorre por diferença de tempo de ciclo não será considerada para o cálculo dos pulmões, uma vez que não afeta os recursos-gargalos. Estes estarão trabalhando continuamente e afetarão os postos de menor tempo de ciclo, ou seja, de maior capacidade na linha de produção. Portanto, no momento que ocorrer, será a forma dos recursos-gargalos ditarem o ritmo da linha, impedindo que os recursos não-gargalos produzam mais que o necessário. Será a forma de controlar a ativação destes últimos.

Contudo, os recursos-gargalo não só determinam o fluxo do sistema todo, mas também definem seus estoques. Estes são dimensionados e localizados em pontos tais que consigam isolar os gargalos de flutuações estatísticas propagadas por recursos não-gargalos que os alimentam. A única forma dos recursos não-gargalos afetarem os RRC's é na situação de paradas dos seus postos vizinhos que poderão induzir os recursos-gargalos a também parar, mesmo estes últimos estando disponíveis à produzir. Logo, esta influência deverá ser levada em consideração no cálculo dos pulmões.

4.2.5 Montagem das Equações

A fim de calcular a quantidade mínima que os pulmões devem ter para atingir a produção desejada, o modelo deste trabalho deve estabelecer equações para o cálculo, considerando que a linha está sujeita a falhas e seus postos não são balanceados.

Inicialmente, os dados de entrada do modelo estão listados abaixo:

- a) A produção diária representada por O (*Output*);
- b) O tempo requerido T_R para realizar a produção O ;
- c) O tempo de ciclo t_{cn} de cada posto;
- d) O tempo médio entre falhas ($MTBF_n$) de cada posto;

- e) O tempo médio até o reparo (MTTR_n) de cada posto;
- f) Nível de Qualidade NQ_n de cada posto.

Deve ser determinado o tempo necessário para realizar a produção diária, ou seja, o tempo que o posto deve permanecer em seu estado produtivo. Este tempo é a multiplicação do tempo de ciclo de cada posto pela produção diária. Este valor não pode ser maior que o tempo requerido, senão haverá falta de capacidade do posto de trabalho. O tempo de estado produtivo dividido pelo tempo requerido

representa a fração necessária em estado produtivo (fEP). Logo, a equação é dada abaixo:

$$\mathbf{f \text{ Estado Produtivo} = (t_{cn} * O) / T_R} \quad (11)$$

Entretanto, esta fração de estado produtivo seria para um aproveitamento total de subconjuntos conformes, sem retrabalhos e nem sucatas. Por isso, esta fração deve ser corrigida pelo seu nível de qualidade a fim de compensar as pequenas perdas ocorridas na linha. Vale ressaltar que o SPE prevê um fluxo contínuo na linha de produção e, caso haja um baixo nível de qualidade, haverão seguidas quebras neste ritmo devido ao retrabalho. A importância deste índice entra, principalmente, para proteger o recurso com restrição de capacidade. Enfim, será conhecida a fração de estado produtivo corrigido pelo nível de qualidade (fEQ), dada pela equação (11) dividida pelo nível de qualidade do posto, como segue abaixo:

$$\mathbf{fEQ = fEP / NQ_n} \quad (12)$$

Vale ressaltar que, se o valor de fEQ for maior que 1, indica que o posto de trabalho não tem capacidade produtiva, pois seu nível de qualidade não é adequado. Neste caso, a quantidade de peças defeituosas produzidas com relação ao objetivo de produção é elevada.

Considerando que as taxas de falhas e de reparos são exponencialmente distribuídas, então haverá um processo de formação de filas com a propriedade marcoviana. Os clientes deste sistema são as paradas dos equipamentos. As mesmas chegam ao posto de trabalho a uma taxa λ igual a $1/MTBF$, as quais são atendidas, seja pelo operário ou pelo manutentor, a uma taxa μ igual a $1/MTTR$. Portanto, há um atendente. Cada posto possui a sua própria taxa de chegadas e taxa de reparos, ou seja, é um processo de diversas filas, independentes uma das outras. Por definição, o modelo de fila aplicável será o M/M/1. O posto de trabalho estará disponível se não houverem paradas para serem atendidas, ou seja, P_0 . Como é conhecido o tempo médio entre falhas e o tempo médio até o reparo, é possível determinar a probabilidade em que o posto de trabalho estará disponível P_A , conforme equação (10):

$$P_A = P_0 = \rho^0 (1 - \rho) \rightarrow A = 1 - (\lambda/\mu) \rightarrow P_A = 1 - [(1/MTBF)/(1/MTTR)] \rightarrow$$

$$P_A = 1 - (MTTR/MTBF) \rightarrow$$

$$P_A = (MTBF - MTTR)/MTBF \quad (13)$$

Observa-se que a equação (4) no item 2.4.3 da disponibilidade se diferencia da equação (13) da probabilidade da disponibilidade pelo fato da primeira levar em consideração tempos mais determinísticos que na segunda. De qualquer forma, ambas são estimativas e, quanto mais os tempos de reparo forem menores, mais as duas se aproximarão.

A diferença entre a probabilidade da disponibilidade P_A e a fração em estado produtivo corrigido fEQ representam a probabilidade ou a parcela em que o posto pode ser induzido a parar, ou seja, permanece indisponível devido a bloqueio do posto posterior ou ocioso pelo posto anterior. A equação 14 mostra o cálculo desta parcela de indisponibilidade induzida P_I :

$$P_I = P_A - fEQ \quad (14)$$

Este valor deve ser maior que zero, senão faltará capacidade no posto. Como a disponibilidade engloba, na sua maior parte, as paradas funcionais

necessárias ao equipamento, como troca de ferramentas, e as possíveis manutenções corretivas devido a panes, se este valor for negativo, deve-se considerar somente a parcela referente as possíveis panes. As paradas funcionais deverão ser executadas fora do tempo requerido de produção, ou seja, quando não houver ninguém trabalhando no posto. Se, mesmo ao retirar a parcela das paradas funcionais, o valor permanecer negativo, a probabilidade de não atingir a produção diária é muito alta e o tempo requerido não comporta a produção. Significará que a margem de segurança estipulada para as panes é menor que o histórico do equipamento ou o tempo de ciclo está alto, necessitando um rebalanceamento da linha. Neste caso, o modelo não se aplica. Antes disso, caso um novo balanceamento não seja possível, melhorias no que diz respeito a confiabilidade dos equipamentos devem ser realizadas para aplicação do modelo. Enfim, considerando a parcela de indisponibilidade induzida P_i permitida em cada posto, esta servirá de base para o cálculo dos pulmões entre os postos.

Em seu trabalho, RADOVILSKY (1998) propõe um modelo de cálculo de pulmão baseado na Teoria das Restrições, o qual utiliza uma fila M/M/1/K. O pulmão era calculado em função da probabilidade que o sistema não ultrapassasse um limite α , com o menor custo de estoque e o maior Ganho (GOLDRATT, COX, 1986). Porém, o autor considerava apenas um sistema, não uma linha de produção conforme proposto neste trabalho.

O modelo adotará a parcela de indisponibilidade induzida P_i como sendo o limite α para o cálculo dos pulmões, porém para outro sistema de filas. O modelo considerará filas D/D/1/K-1 em série, ou seja, tempos de ciclo determinísticos e filas M/M/1 individuais de paradas em cada posto, com tempos exponenciais. As incógnitas são, com base no esquema da figura 11, os pulmões K_{12} e K_{23} . Portanto, o cliente em atendimento não está inserido na capacidade do sistema, o qual possuirá como valor mínimo igual a 1. Este valor representa o mínimo isolamento desejado entre os postos e assim, permite que os mesmos trabalhem uma parte do tempo requerido dentro do seu tempo de ciclo. Caso não haja este pulmão mínimo, o tempo de ciclo de dois postos seguidos sempre será ditado pelo maior.

Cada pulmão proporcionará uma proteção em tempo aos seus postos adjacentes, que será em função da capacidade do pulmão e do tempo de ciclo do posto. A equação abaixo mostra este tempo de proteção TP:

$$TP_n = K * t_{cn} \quad (15)$$

Os pulmões serão calculados em função das probabilidades de eventos de indisponibilidade induzida, tais como saturação de linha e ociosidade do posto, visando um recurso-gargalo. Por serem tempos determinísticos, considera-se que o pulmão à frente do gargalo estará vazio e o de trás, estará completo para proteger o pulmão. Desta forma, serão desenvolvidas equações com os fatores capacidade dos pulmões $K_{n,n+1}$ e, por conseguinte, poderão ser obtidos os pulmões.

Os eventos de probabilidade indisponibilidade induzida associados a cada sistema são mostrados na quadro 2.

QUADRO 2 – EVENTOS DOS SISTEMAS.

	VAZIO	SATURADO
POSTO 1	Impossível	Possível
POSTO 2	Possível	Possível
POSTO 3	Possível	Impossível

Montando as equações por sistema:

a) Posto sistema 1

- Probabilidade do posto estar saturado PS_1 = probabilidade do posto 2 estar parado * probabilidade do posto 1 estar disponível * probabilidade do tempo de reparo do posto 2 seja superior que o tempo de pulmão do posto 1.

Para definir a probabilidade no último fator, por ser uma distribuição exponencial os tempos de parada e reparo, será utilizada a sua função de densidade acumulada (PRADO, 1999, p. 50) e o tempo do pulmão será dado conforme a equação (15).

$$PS_1 = P_{A1} * (1 - P_{A2}) * [1 - (1 - e^{-(K12 * t_{c1}) / MTTR2})]$$

$$PS_1 = [P_{A1} * (1 - P_{A2})] / e^{(K12 * t_{c1}) / MTTR2} \quad (16)$$

- Probabilidade do posto estar ocioso $PO_1 = 0$ (17)

b) Posto sistema 2

- Probabilidade do posto estar saturado PS_2 = probabilidade do posto 3 estar parado * probabilidade do posto 2 estar disponível * probabilidade do tempo de reparo do posto 3 seja superior que o tempo de pulmão do posto 2.

Assim como a equação (16), aplica-se para equação (18):

$$PS_2 = [P_{A2} * (1 - P_{A3})] / e^{(K23 * tc2) / MTTR3} \quad (18)$$

- Probabilidade do posto estar ocioso PO_2 = Probabilidade do posto 1 estar parado * probabilidade do posto 2 estar disponível * probabilidade do tempo de reparo do posto 1 seja superior que o tempo de pulmão do posto 2.

O mesmo princípio para saturação será utilizado para ociosidade, com a aplicação da equação (16):

$$PO_2 = [P_{A2} * (1 - P_{A1})] / e^{(K12 * tc2) / MTTR1} \quad (19)$$

c) Posto sistema 3

- Probabilidade do posto estar saturado $PS_3 = 0$ (20)

- Probabilidade do posto estar ocioso PO_3 = Probabilidade do posto 2 estar parado * probabilidade do posto 3 estar disponível * probabilidade do tempo de reparo do posto 2 seja superior que o tempo de pulmão do posto 3.

Aplicando a equação (19):

$$PO_3 = [P_{A3} * (1 - P_{A2})] / e^{(K23 * tc3) / MTTR2} \quad (21)$$

A fim de determinar a capacidade dos pulmões, as equações (16), (17), (18), (19), (20) e (21) devem ser menores ou iguais aos valores máximos de indisponibilidade induzida de cada posto. Isto será chamado de Equilíbrio nos postos. É a condição principal de que os postos não percam produção devido a saturação e ociosidade. O quadro 3 mostra o equilíbrio nos postos para o esquema da figura 11, o qual deve ser respeitado.

O gráfico 2 mostra a evolução do resultado das equações à medida que se aumenta a capacidade dos pulmões. Considerou-se os três postos com 97% de probabilidade de disponibilidade, um tempo de ciclo de 2 min/peça e um tempo médio até o reparo de 4 minutos. Desta forma, as equações dos postos 1 e 3 se equivaleram. Nota-se que o aumento da capacidade dos pulmões diminui a probabilidade de saturação e ociosidade nos postos. A equação do posto 2 foi exatamente o somatório das equações dos postos 1 e 3, visto que todos os parâmetros da linha são idênticos. No caso das equações destes postos, por não estarem sujeitas as duas condições, partiram com valores menores e rapidamente os valores tenderam a zero. Portanto, o recurso-gargalo da linha que estiver no limite de não atender a produção, terá os seus pulmões aumentados para protegê-lo das variações estocásticas. Este aumento não será muito expressivo, visto que a partir de um certo limite, aumentar a capacidade dos pulmões pouco influenciará no resultado da equação. Pode-se perceber pelas equações que o cálculo da capacidade dos pulmões não pode ser executado individualmente. Isto porque a capacidade de um sistema afeta a probabilidade de saturação e ociosidade na equação de dois postos. Sendo assim, deve ser empregado um método numérico para encontrar a menor capacidade dos pulmões que consiga equilibrar estas equações.

QUADRO 3 – EQUILÍBRIO DOS POSTOS

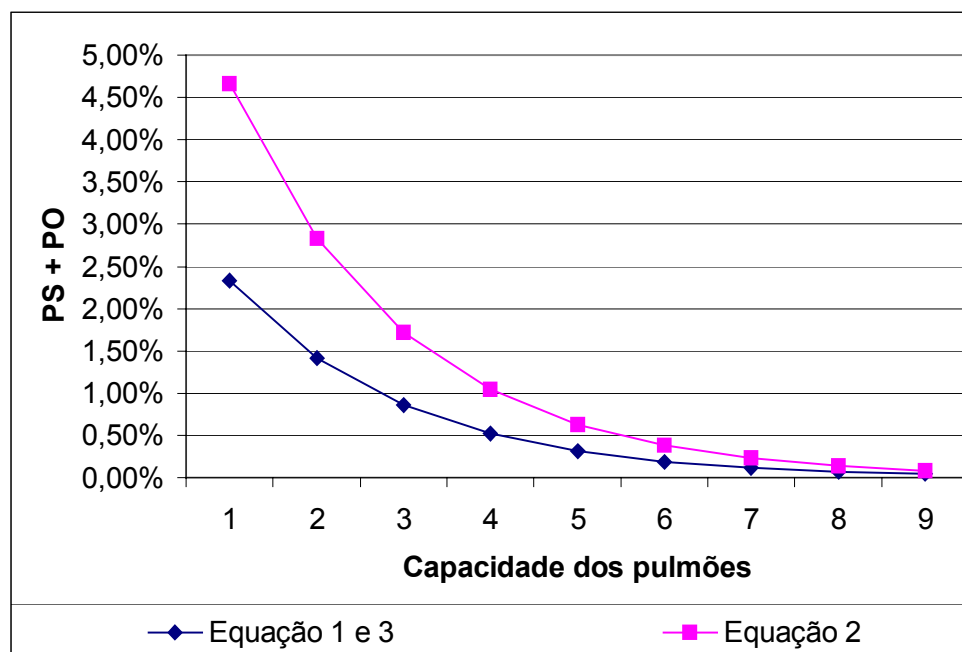
Posto	P_{In}	\geq	$PS_n + PO_n$
1	$P_{A1} - (Tc_1 * O) / NQ_1 * T_R$	\geq	$[P_{A1} * (1 - P_{A2})] / e^{(K_{12} * tc_1) / MTTR_2} + 0$
2	$P_{A2} - (Tc_2 * O) / NQ_2 * T_R$	\geq	$[P_{A2} * (1 - P_{A3})] / e^{(K_{23} * tc_2) / MTTR_3} + [P_{A2} * (1 - P_{A1})] / e^{(K_{12} * tc_2) / MTTR_1}$
3	$P_{A3} - (Tc_3 * O) / NQ_3 * T_R$	\geq	$0 + [P_{A3} * (1 - P_{A2})] / e^{(K_{23} * tc_3) / MTTR_2}$

A fim de resolver este problema de programação não-linear, será feito uso do método numérico da ferramenta Solver, pertencente ao *software* Excell (MICROSOFT CORPORATION, 1998).

No desenvolvimento das equações, foi utilizada uma linha com a quantidade mínima de postos de diferentes características: posto de entrada, posto de meio de

linha e posto de final de linha. O aumento da linha de produção aumentará a quantidade de postos com característica de meio de linha. Portanto, a fim de generalizar a solução para linhas de mais de 3 postos, deve-se repetir a equação 2 para o segundo posto de linha, para o terceiro, quarto e assim sucessivamente. O sistema de equações para equilíbrio dos postos para uma linha de produção com Z postos, se dará conforme o quadro 4.

GRÁFICO 2 – EVOLUÇÃO DO RESULTADO DAS EQUAÇÕES EM FUNÇÃO DA CAPACIDADE DOS PULMÕES



QUADRO 4 – EQUILÍBRIO DOS POSTOS PARA LINHA DE Z POSTOS

Posto	P_{In}	\geq	$PS_n + PO_n$
1	$P_{A1} - (t_{c1} * O) / NQ_1 * T_R$	\geq	$[P_{A1} * (1 - P_{A2})] / e^{(K_{12} * t_{c1}) / MTTR_2}$
.	.	.	.
.	.	.	.
$1 < x < z$	$P_{Ax} - (t_{cx} * O) / NQ_x * T_R$	\geq	$[P_{Ax} * (1 - P_{A,x+1})] / e^{(K_{x,x+1} * t_{cx}) / MTTR_{x+1}} + [P_{Ax} * (1 - P_{A,x-1})] / e^{(K_{x-1,x} * t_{cx}) / MTTR_{x-1}}$
z	$P_{Az} - (t_{cz} * O) / NQ_z * T_R$	\geq	$[P_{Az} * (1 - P_{A,z-1})] / e^{(K_{z-1,z} * t_{cz}) / MTTR_{z-1}}$

4.3 EXCELL COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE

Uma vez que o objetivo do trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta prática e rápida, optou-se pelo uso de novas tecnologias, enfatizando a planilha eletrônica.

O *software* Excell é o líder de mercado em planilhas eletrônicas, portanto, largamente difundido entre as empresas. Segundo SILVA (1999, p. VI), o Excell não é um programa destinado especificamente a Probabilidade e Estatística, porém possui diversas qualidades. É extremamente popular, acessível; pode ser aprendido com facilidade, não requerendo conhecimento de programação em computadores; tem um formato que torna concreto os algoritmos, seus usos e visualizações; permite modificar facilmente aspectos de determinado raciocínio lógico e a visualização instantânea dos efeitos dessas mudanças; libera o usuário da manipulação trabalhosa de números; este, sem precisar preocupar-se com os cálculos complexos, pode concentrar-se apenas no problema e na exploração significativa da aplicação dos conceitos.

Dentre as ferramentas disponíveis no Excell, o modelo fará uso do Solver. Segundo IBM (1998), utiliza-se Solver para encontrar o valor mais favorável dos resultados de uma célula de destino, através do ajuste de valores das células variáveis, das quais depende o resultado. Além disso, ao especificar restrições nos valores encontrados nas células de destino ou outras células envolvidas no cálculo, a solução pode ser mais ainda específica. O Solver pode analisar três tipos de problemas: linear, não-linear e inteiro. O quadro 5 mostra os termos utilizados para definir um problema pelo Solver. Vale ressaltar que o método numérico do Solver possui algumas limitações quando comparado a outros programas específicos para esta finalidade. Se o seu número de iterações não for suficiente, pode não encontrar a solução verdadeiramente ótima, mas uma solução satisfatória.

4.3.1. Construção da Planilha Eletrônica

A construção da planilha eletrônica será para 4 postos, entretanto, a lógica de construção para 4 postos obedece para 3 ou 4+n postos, conforme mostrado anteriormente. A lógica segue a mesma da construção do sistema das equações.

4.3.1.1 Inserção Dados de Entrada

Deve-se conhecer a quantidade de postos de trabalho na linha de produção onde será montada o sistema de equações. Neste caso, foi definida como sendo de 4 postos. A figura 12 mostra a planilha eletrônica com a estrutura de inserção de dados. Os postos 1, 2, 3 e 4 (linha 1) recebem os dados nas colunas B, C, D e E.

QUADRO 5 - TERMOS DO SOLVER

TERMO	DESCRIÇÃO
Célula de Destino	É a célula mais apropriada para localizar uma solução máxima, mínima ou igual a um valor de destino específico. Pode-se referir a célula de destino como o objetivo ou função objetivo .
Células variáveis	São as células principais; delas dependem as células de destino. Os valores destas células são ajustadas pelo Solver, até que seja encontrada uma solução desejada para as células de destino. Pode-se especificar até 200 células variáveis.
Restrições	<p>É limite ou condição especificada sobre o valor de uma célula. Pode-se especificar uma restrição para qualquer célula variável ou célula de destino. Além disso, pode-se também especificar restrições para qualquer célula que está direta ou indiretamente afetada pelas células variáveis.</p> <p>Para cada célula variável pode-se especificar duas restrições, geralmente um limite máximo e um mínimo. Pode-se especificar até 100 restrições adicionais para as células variáveis.</p> <p>Pode-se especificar células individuais ou intervalos em uma restrição e</p>

	esta pode ser aplicada num máximo de 1000 células em um problema.
--	---

Primeiramente, deve-se entrar com dados de tempo de ciclo de cada posto (linha 2), produção diária a ser atingida (linha 3), tempo requerido de produção (linha 4), nível de qualidade (linha 5), *MTBF* (linha 7) e *MTTR* (linha 8) de cada posto. Desta forma, a planilha determina na linha 6 a fração de estado produtivo corrigido necessário e na linha 9 é calculada a probabilidade de disponibilidade P_{An} de cada posto. Sendo assim, a Indisponibilidade Induzida de cada posto é determinada na linha 10.

FIGURA 12 - ENTRADA DOS DADOS DA PLANILHA ELETRÔNICA

	A	B	C	D	E
1	POSTO	1	2	3	4
2	Tempo de ciclo (min/peça)	1,7	1,8	2	1,5
3	Produção diária (peças)	210	210	210	210
4	Tempo Requerido (min)	470	470	470	470
5	Nível de Qualidade	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999
6	f Estado Produtivo Corrigido	$=(B2*B3)/(B4*B5)$	$=(C2*C3)/(C4*C5)$	$=(D2*D3)/(D4*D5)$	$=(E2*E3)/(E4*E5)$
7	MTBF (min)	1600	1600	1600	1600
8	MTTR (min)	15	15	15	15
9	P_a	$=(B7-B8)/B7$	$=(C7-C8)/C7$	$=(D7-D8)/D7$	$=(E7-E8)/E7$
10	Indisponibilidade Induzida	$=B9-B6$	$=C9-C6$	$=D9-D6$	$=E9-E6$
11					
12	Capacidade Sistemas	K12	K23	K34	TOTAL
13	Otimizado	4,21977051733632	9,47387464153968	6,28311289432426	$=SOMA(B13:D13)$
14	Inteiro	$=ARRED(B13;0)$	$=ARRED(C13;0)$	$=ARRED(D13;0)$	$=SOMA(B14:D14)$
15	Ajustado	$=SE(B19>B10,B14+1,B14)$	$=SE(C19>C10,C14+1,C14)$	$=SE(D19>D10,D14+1,D14)$	$=SOMA(B15:D15)$
16					0
17	Equilíbrio nos postos	Posto 1	Posto 2	Posto 3	Posto 4
18	Otimizado	$=B\$9*(1-C\$9)/EXP(B8*B\$2/1600)$	$=C\$9*(1-D\$9)/EXP(C8*1600)$	$=D\$9*(1-E\$9)/EXP(D8*1600)$	$=(1-D\$9)*E\$9/EXP(D8*1600)$
19	Inteiro	$=B\$9*(1-C\$9)/EXP(B9*B\$2/1600)$	$=C\$9*(1-D\$9)/EXP(C9*1600)$	$=D\$9*(1-E\$9)/EXP(D9*1600)$	$=(1-D\$9)*E\$9/EXP(D9*1600)$
20	Ajustado	$=B\$9*(1-C\$9)/EXP(B10*B\$2/1600)$	$=C\$9*(1-D\$9)/EXP(C10*1600)$	$=D\$9*(1-E\$9)/EXP(D10*1600)$	$=(1-D\$9)*E\$9/EXP(D10*1600)$

4.3.1.2 Parametrização da Solução

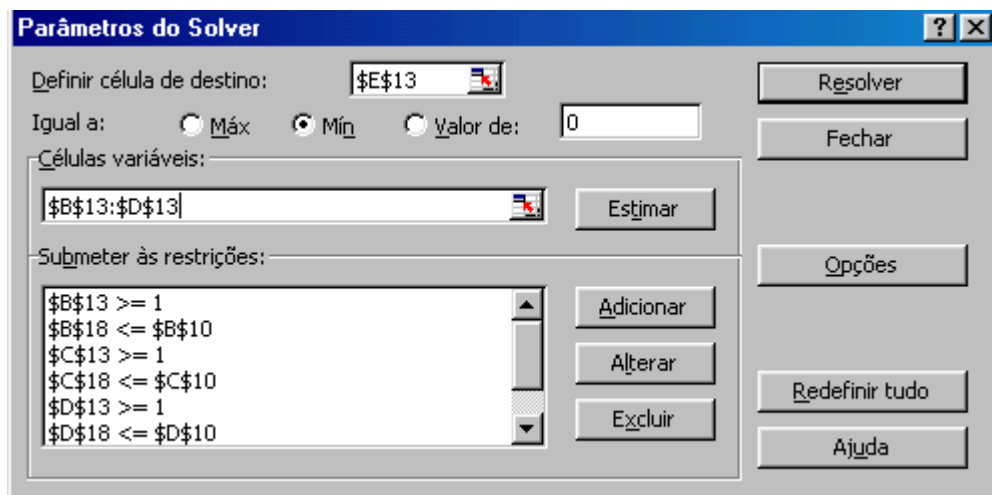
A célula de destino para cálculo com o Solver é a E13, no quadro denominado na figura 12 como Capacidade Sistemas. Esta é a soma das capacidades de cada pulmão e tem o seu valor minimizado pelo Solver. As células variáveis são aquelas indicadas na soma da célula de destino. O Solver simula valores nestas células para atender as restrições.

A primeira restrição do modelo o qual Solver deve respeitar é que todos pulmões têm de capacidade no mínimo 1. A segunda e a mais importante restrição

está no quadro Equilíbrio nos postos da figura 12. A linha 18 mostra o sistema de equações em função das capacidades dos pulmões para cada posto. Os seus valores devem ser menores que os valores das Indisponibilidades Induzidas na linha 10.

A célula de destino, as células variáveis, a função objetivo de minimização da célula de destino e as restrições são mostradas na figura 13, quando da parametrização do Solver no Excell.

FIGURA 13 – PARAMETRIZAÇÃO DO SOLVER



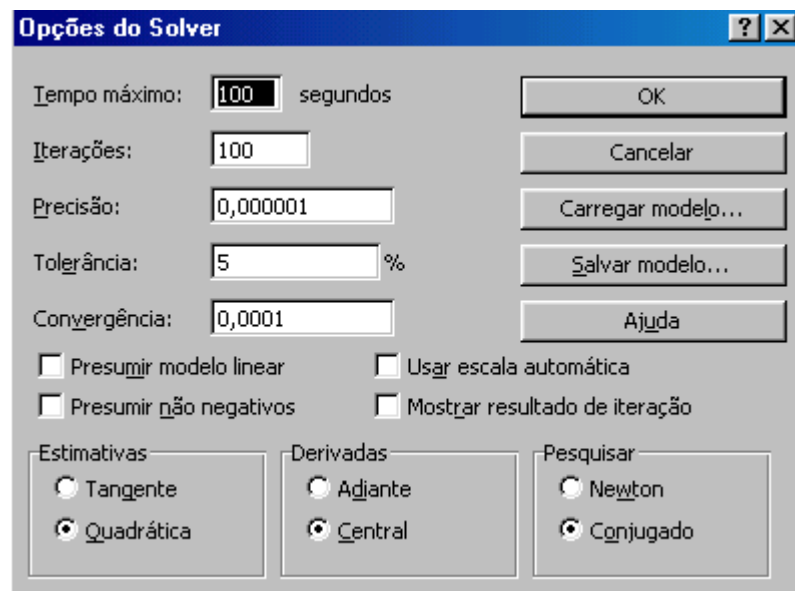
4.3.1.3 Determinação dos Pulmões

Após a parametrização da solução, deve-se configurar Opções do Solver, mostrado na figura 14. Os dados *default* de Tolerância, Iterações, Convergência, Precisão e Tempo Máximo já são suficientes para resolver o sistema de equações. Os mais importantes são Estimativas e Derivadas. Estes permitirão com maior facilidade o Solver encontrar a solução ótima. Segundo INFERÊNCIA (1997, p 61), deve-se aplicar a estimativa quadrática pois usa extrapolação quadrática, que melhora os resultados em problemas altamente não-lineares, como o sistema de equações proposto pelo modelo. Além deste, aplica-se a derivada Central visto que

é indicada para ser utilizada quando o Solver retornar uma mensagem informando que não consegue melhorar a solução, apesar desta opção requerer mais cálculos.

Enfim, é solicitado ao Excell que resolva o problema. A fim de facilitar a resolução, deve-se iniciar a linha 13 da figura 12 com valores próximos do que o Solver deve buscar. Desta forma, evita iterações desnecessárias. O Solver fará as iterações necessárias para encontrar os valores de capacidade dos pulmões que atenda a todas as restrições e a função objetivo.

FIGURA 14 – CONFIGURAÇÃO DE OPÇÕES DO SOLVER



Os valores serão mostrados na linha 13. Entretanto, estes serão valores não inteiros o que não representa a realidade da linha de produção. Por necessitar de valores discretos, estas capacidades são arredondadas na linha 14 e o equilíbrio nos postos recalculados na linha 19, ambas as linhas denominadas na figura 12 de *Inteiro*. A definição final da correta capacidade dos pulmões vem da condição na linha 15. Se após o arredondamento dos valores, algum posto tiver o valor do seu equilíbrio de probabilidades maior que indisponibilidade induzida, é acrescida de 1 (um) a capacidade no pulmão. Senão é mantida a capacidade encontrada. A linha 20 da figura 12, denominada de *Ajustado*, serve como verificador que a condição do equilíbrio nos postos é respeitada.

4.4 TESTES DE FUNCIONAMENTO

A fim de conhecer a aplicação dos conceitos pela ferramenta e verificar possíveis anomalias de funcionamento, diversos testes foram realizados para verificar o comportamento dos pulmões na linha de produção.

Foi considerada uma linha de produção composta de 7 postos, onde devem ser produzidas 220 peças num tempo requerido de 470 min. Foi analisada a variação do tempo de ciclo e da disponibilidade em um ou mais postos da linha. Deste modo, estudou-se o efeito de gargalos no que diz respeito a sua posição na linha e restrição de capacidade com relação aos demais postos. Em todos os casos o nível de qualidade estipulado foi de 99,99%.

O gráfico 3 mostra o efeito da diminuição da disponibilidade do posto 4 nos pulmões da linha. Considerou-se um tempo de ciclo idêntico de 2 min/pç para todos os postos e a disponibilidade foi reduzida de 97% até 93,7%, o qual estaria muito próximo do limite do posto se tornar incapaz de realizar a produção dentro do tempo requerido. Nota-se, a partir somente de 95,5%, um aumento gradativo na capacidade dos pulmões K_{34} e K_{45} que estão em torno do gargalo. Na medida que a disponibilidade é reduzida, a capacidade aumenta de 1 a 7.

Já o gráfico 4 mostra o mesmo estudo, todavia para o tempo de ciclo. A disponibilidade considerada em toda linha foi de 97%, e o tempo de ciclo do posto 4 foi aumentado percentualmente de 1% até 3,5% com relação aos postos restantes. O valor de 3,5% está próximo do limite do posto se tornar incapaz de produzir dentro do tempo requerido. Observa-se que, assim como a disponibilidade, a capacidade dos pulmões que circundam o gargalo aumenta gradativamente de 1 até 6.

GRÁFICO 3 – EFEITO DA REDUÇÃO DA DISPONIBILIDADE NOS PULMÕES DE UM POSTO GARGALO

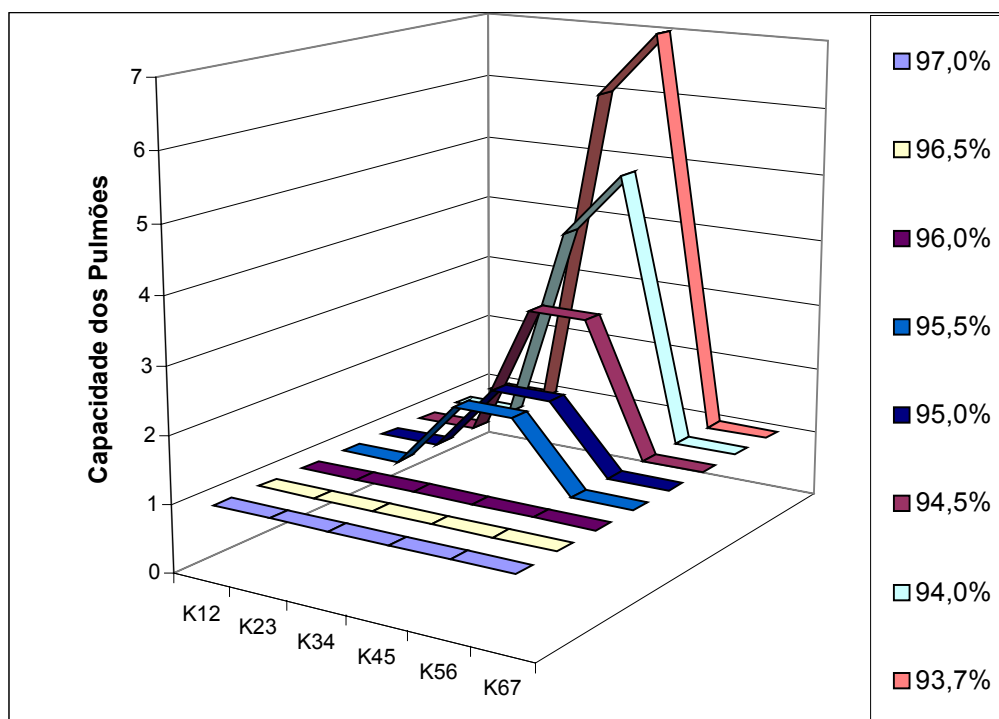
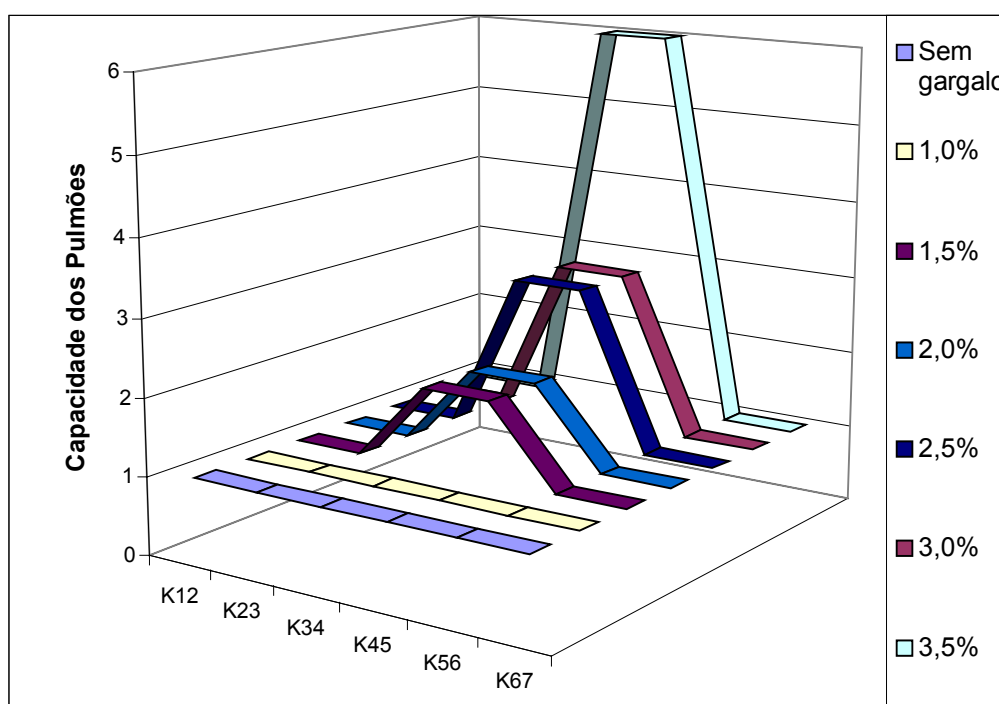
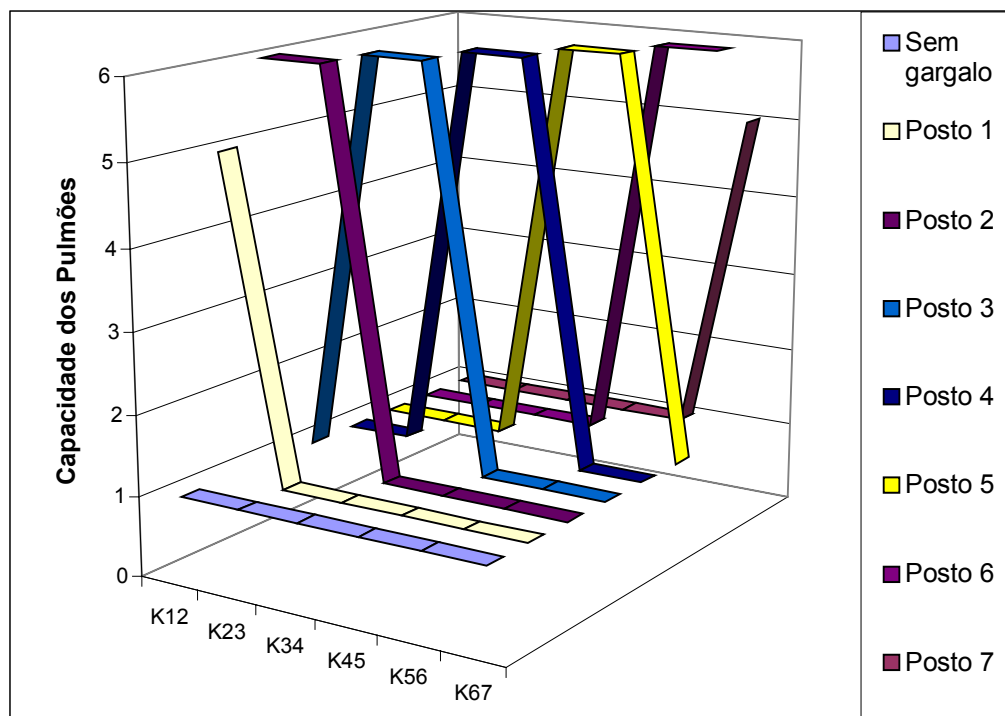


GRÁFICO 4 – EFEITO DO AUMENTO DO TEMPO DE CICLO NOS PULMÕES DE UM POSTO GARGALO



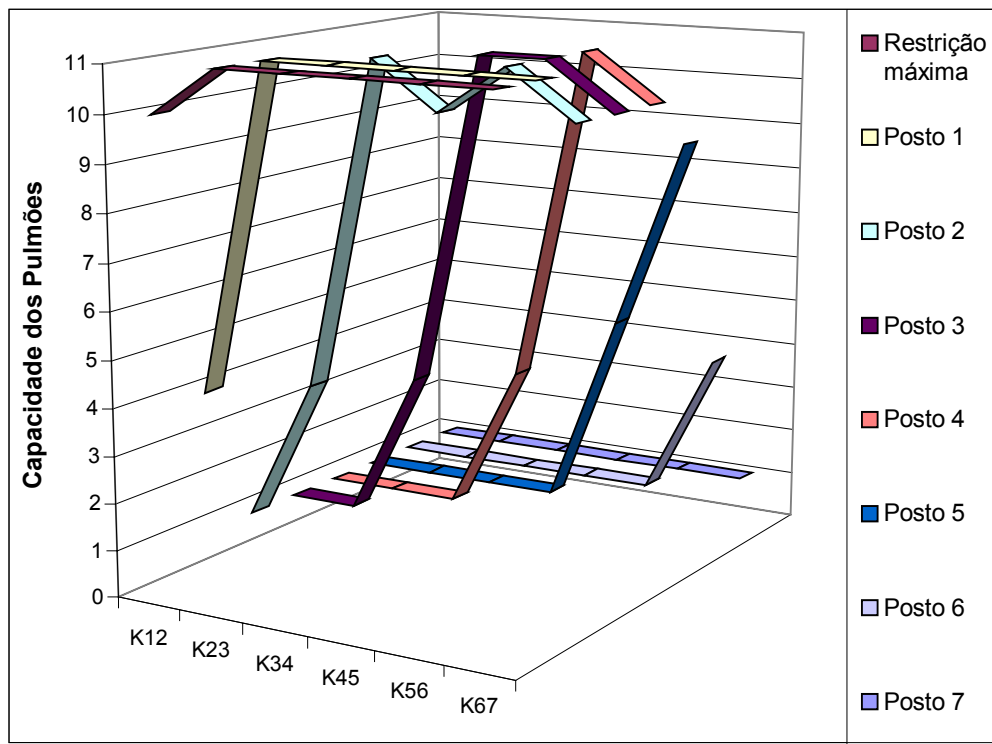
O gráfico 6 mostra o efeito da posição de um posto gargalo em tempo de ciclo nos pulmões na linha de produção. Os postos também estão balanceados para um tempo de ciclo de 2 min/pç, com uma disponibilidade de 97%. O posto gargalo, neste caso, possui um tempo de ciclo 3,5% maior que o restante, e também se inicia no posto 1 e caminha até o posto 7. Observa-se o mesmo comportamento nos pulmões que um gargalo de disponibilidade ocasiona. Quando o gargalo é um posto da extremidade, o pulmão necessita de um menor capacidade quando o gargalo se encontra num posto ao centro da linha.

GRÁFICO 6 – EFEITO DA POSIÇÃO DE UM POSTO GARGALO EM TEMPO DE CICLO NOS PULMÕES



Todos os gráficos anteriores mostraram a situação onde um posto somente possuiria uma menor capacidade produtiva com relação aos restantes, seja devido a sua menor disponibilidade ou seu maior tempo de ciclo. O gráfico 7 mostra o efeito nos pulmões quando há mais de um posto com menor disponibilidade com relação aos demais. Assim como o gráfico 5, deslocou-se a restrição de disponibilidade ao longo da linha, porém mantendo-a nos postos a medida que avança. O tempo de

GRÁFICO 8 – MUDANÇA DE PATAMAR REGRESSIVO DE DISPONIBILIDADE



Finalmente, os gráficos 9 e 10 mostram a mesma mudança de patamar progressivo e regressivo, só que para gargalos em tempo de ciclo. Assim como nos outros gráficos de tempo de ciclo, a mudança de patamar ocorre de um tempo de ciclo de 2 min/pç para um 3,5% maior. A mudança de patamar progressivo é um espelho da mudança de patamar regressivo, mesmo fenômeno para gargalo de disponibilidade. Entretanto, o pulmão entre dois gargalos tem a mesma capacidade quando circunda um gargalo. Isto ocorre devido os tempos de ciclo serem considerados tempos determinísticos, ao contrário dos tempos de paradas que são considerados tempos exponencialmente distribuídos.

5 ESTUDO DE CAMPO

5.1 A EMPRESA

Uma vez que a metodologia de pesquisa foi a hipotética-dedutiva, após a construção do modelo para o cálculo da capacidade dos pulmões, fez-se necessário um estudo de investigação em uma situação real, ou seja, um estudo de campo quantitativo (MOREIRA, 2001, p. 9) a fim de comprovar a eficácia do mesmo.

A empresa na qual foi aplicado o modelo pertence ao setor automotivo do Estado do Paraná. A mesma fabrica conjuntos para serem montados nas carrocerias de veículos produzidos também neste Estado.

Esta empresa foi escolhida devido, primeiramente, a facilidade da coleta dos dados, ou seja, os dados de entrada eram acessíveis. Todos os dados de entrada são levantados diariamente pela empresa para acompanhamento do seu próprio desempenho. Em segundo lugar, a aplicação do modelo para verificar a eficácia não requeria investimentos para a linha de produção aplicada. Além disso, a empresa busca reduzir o nível de estoque intermediário nas suas diferentes linhas de produção, sem comprometer o fluxo produtivo e a produção diária. Esta redução tem como objetivo obter ganhos de produtividade por compactação de arranjo-físico, evitar deslocamentos desnecessários da mão-de-obra, entre outros.

Os princípios usados no seu sistema de produção são aqueles da Produção Enxuta. As suas linhas de produção trabalham em função da demanda e são abastecidas pelo sistema *kanban*, existindo alguns fornecedores just-in-time. A sua estrutura de produção é dividida por células de trabalho com arranjo-físico funcional. Nestas células é desenvolvida a polivalência entre os operários.

A aplicação do modelo foi desenvolvida com base nos dados obtidos na empresa. Quase todas as entradas do modelo são dados conhecidos pela empresa, entre eles, os tempos de ciclo de cada posto, os seus índices de qualidade, o tempo requerido e a demanda da produção da linha. Para as entradas que não eram

diretamente conhecidas, existiam dados donde puderam ser extraídas as informações, tais como, o histórico de falhas, as trocas de ferramentas, preparações de posto, automanutenção, entre outros. Após o tratamento dos dados de entrada, os pulmões foram calculados e o modelo foi aplicado durante uma semana de trabalho a fim de avaliar o seu desempenho.

5.1.1 Estrutura Organizacional

A empresa adota uma estrutura funcional composta por departamentos. Estes departamentos são divididos em setores os quais possuem células de trabalho. Estas células de trabalho podem ser compostas por uma ou mais pequenas linhas de produção.

Cada célula de trabalho possui um operador-líder que, além da liderança exercida sobre os demais operários, possui profundos conhecimentos do produto e do processo. Dentre as atividades desenvolvidas por este operador-líder, destacam-se:

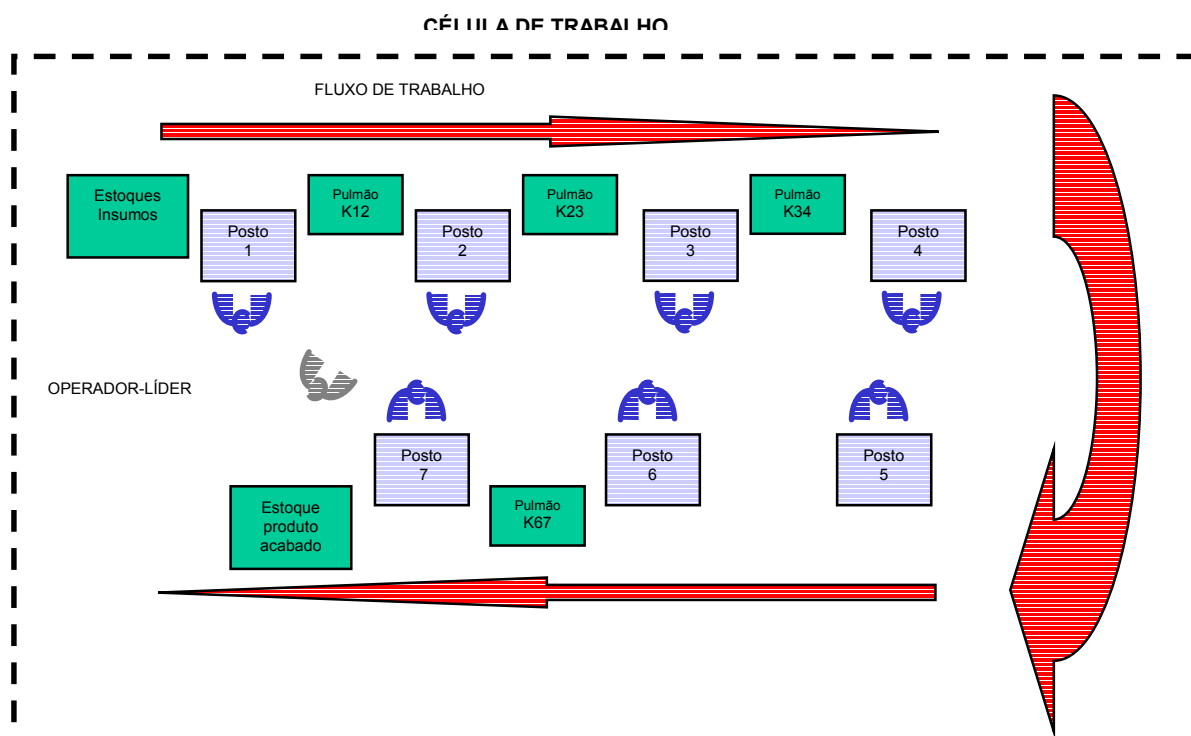
- a) treinar os demais operários nos diversos postos da célula e desenvolver a polivalência;
- b) substituir os ausentes;
- c) efetuar os controles periódicos de qualidade no intuito de monitorar a qualidade do produto;
- d) retrabalhar subconjuntos sinalizados pelos outros operários com problema de qualidade;
- e) ajudar os demais em caso de anomalias na linha;
- f) fazer o levantamento produção diária, com o tempo de suas paradas de linha, e respectivos motivos das paradas;
- g) coordenar a automanutenção e solicitar a manutenção corretiva.

A mão-de-obra é qualificada internamente pela empresa, com diversos treinamentos específicos a fim de desenvolver competências e habilidades para o desempenho da função.

5.2 PROCESSO DA LINHA DE PRODUÇÃO EM ESTUDO

A linha onde foi aplicado o modelo proposto possui 7 postos conectados em série, onde o arranjo-físico adotado é em forma de “U” (BLACK, 1999, p. 90) conforme figura 15. Apesar deste tipo de arranjo-físico facilitar a operação de diversas máquinas por poucos operários, ou seja, mais máquinas do que operários, nesta linha de produção há um operário por posto de trabalho.

FIGURA 15 – LINHA DE PRODUÇÃO DO ESTUDO DE CAMPO



Os postos de trabalho, na sua grande maioria, são compostos por dispositivos pneumáticos e pinças de solda a ponto por resistência. Apenas os três últimos se diferem, visto que são processos de dobramento de chapa (postos 5 e 6)

e de soldagem MIG (Posto 7). Toda a manutenção de primeiro nível (automanutenção) e troca de ferramentas são efetuadas pelos operários. Vale ressaltar que os equipamentos possuem em média 3 anos de uso.

O produto vai sendo montado ao longo da linha, totalizando 14 peças, as quais foram determinadas como peças A, B, C, até peça O. Existe uma parada frequencial a fim de abastecer os postos com uma quantidade de peças, evitando longos deslocamentos da mão-de-obra até as embalagens destas peças. Este abastecimento é denominado de preparação de linha. Os subconjuntos montados ao final de cada posto são transportados manualmente pelos operários até o pulmão, os quais servem de insumo para o posto seguinte. Portanto, o lote de transferência é unitário. O sistema empregado nos pulmões que antecedem os postos de trabalho é o FIFO. A capacidade dos pulmões na situação atual é mostrada na tabela 2. Note-se que não há pulmões entre os postos 4, 5 e 6.

TABELA 2 – CAPACIDADE DOS PULMÕES NA SITUAÇÃO ATUAL

POSTO	K12	K23	K34	K45	K56	K67
Situação atual	11	7	7	0	0	1

5.3. LEVANTAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA

O estudo de campo realizado nesta linha se baseou na produção de 226 peças para um tempo requerido de 470 minutos, o que equivale um turno de trabalho.

No intuito de atender esta demanda, a Engenharia Industrial da fábrica balanceou a linha de produção com o tempo de ciclo objetivo de 2,10 minutos por peça. Em função das especificidades dos postos de trabalho e da seqüência de montagem da peça, os valores de tempo de ciclo por posto não poderiam ultrapassar este valor. A tabela 3 mostra a média da medição de 50 ciclos, onde a somatória dos tempos de operação são 10,71 minutos, fator importante no cálculo do lead-time. Utilizou-se tempos reais a fim de reduzir o erro que os tempos padrões poderiam ocasionar na aplicação do modelo.

TABELA 3 – TEMPO DE CICLO POR POSTO DE TRABALHO

POSTO	1	2	3	4	5	6	7	Total
Tempo de ciclo (min/peça)	1,65	1,74	1,81	1,59	1,38	1,34	1,20	10,71

Os níveis de qualidade dos postos de trabalho foram levantados a partir do controle realizado pelo operador-líder da linha de produção. Diariamente, este contabiliza todos os defeitos retrabalhados na sua linha. Com base na produção diária, é possível determinar os índices de qualidade. A tabela 4 mostra os níveis de qualidade dos postos de trabalho obtidos entre os meses de junho e outubro de 2002.

TABELA 4 – NÍVEL DE QUALIDADE DOS POSTOS DE TRABALHO

POSTO	1	2	3	4	5	6	7
Nível de Qualidade	99,50%	99,00%	99,00%	99,50%	99,50%	99,50%	99,50%

Todos estes dados de entrada já eram conhecidos ou podiam ser facilmente coletados. Entretanto, para a fila M/M/1 de paradas que se forma para cada posto, um estudo mais detalhado foi necessário a fim de determinar a probabilidade de disponibilidade.

Inicialmente, os dados de parada de linha devido a panes dos equipamentos foram levantados junto à supervisão da linha. Como rotina de acompanhamento da performance da linha pela supervisão da produção, todas as paradas de linha são lançadas num banco de dados, onde consta o dia, mês, ano e o tempo da parada. Este banco de dados foi implantado no segundo semestre de 2001, porém somente os dados de 2002 eram confiáveis. Por isso, os dados das falhas se referiram ao período compreendido entre janeiro e outubro de 2002.

Em seguida, foram levantadas todas as paradas funcionais de cada posto, ou seja, automanutenção, troca de ferramentas e preparações de posto quando necessário. Conhecendo a frequência que tais eventos ocorrem e a duração dos mesmos, baseado na produção do período entre janeiro e outubro de 2002, foram determinados os números de ocorrências para cada parada funcional.

TABELA 8– CÁLCULO *MTBF* E *MTTR* DOS POSTOS

	Posto 1	Posto 2	Posto 3	Posto 4	Posto 5	Posto 6	Posto 7
<i>Tempo total observado - T</i>	76395	76395	76395	76395	76395	76395	76395
<i>Tempo total parado</i>	6393	3575	7358	7520	1949	2104	2656
<i>Número total de Paradas - r</i>	3458	712	2273	1155	169	510	1933
<i>MTBF (min)</i>	22	108	34	66	452	150	40
<i>MTTR (min)</i>	2	5	3	7	12	4	1

Uma vez calculado o *MTBF*, foram determinados os limites superior e inferior de confiança à 99% para testes com tempo de duração, conforme as equações (2) e (3). Os valores da distribuição qui-quadrado foram extraídos do *software* Excell (MICROSOFT CORPORATION, 1998) dado segundo SILVA (1999, p. 120). Contudo, para o número de falhas do tempo de observação que representa os graus de liberdade da distribuição, o *software* não retornou valores para o cálculo. Por isso, o tempo de observação para o cálculo dos limites foi reduzido ao mínimo necessário para encontrar valores da distribuição qui-quadrado. Todavia, este tempo de observação atendeu ao período mínimo de ensaio para uma confiança à 99% (BERGAMO FILHO, 1997, p. 45). De acordo com este autor, este tempo mínimo T_a pode ser determinado em função do *MTBF* estimado (*MTBF_e*) do equipamento ou produto que é ensaiado. Este tempo mínimo T_a é dado pela equação (22):

$$T_a = (MTBF_e * \chi^2_{\alpha;2})/2 \quad (22)$$

Aplicando para um α igual a 99% sobre a equação (22), obtém-se que o tempo mínimo do ensaio é de:

$$T_a = MTBF_e * 9,21/2 \rightarrow T_a = 4,605 * MTBF_e$$

Para os *MTBF*'s encontrados, prova que um tempo de observação 5 vezes maior é suficiente para determinar os limites de confiança. A tabela 9 mostra o tempo de observação e o número de falhas utilizados para calcular estes limites, onde se confirma o *MTBF* de cada posto. Os limites inferior e superior foram calculados conforme as equações (2) e (3) do item 2.4.2 desta dissertação. Utilizando o posto 1 como exemplo, passados 12322 minutos, houve 558 paradas. Conforme equação (1), o valor do *MTBF* é T/r , logo $12322/558 = 22$ minutos,

aproximadamente. Para limite de confiança à 99%, deve-se buscar os valores da distribuição Qui-quadrado para $\chi^2_{0,005;1118}$ e $\chi^2_{0,995;1116}$ que são 1243 e 997 e correspondem aos limites inferior e superior, respectivamente. Pelas equações (2) e (3), determina-se os valores do limite inferior e superior, cujos resultados foram arredondados na Tabela 9:

- Limite Inferior = $2T/\chi^2_{0,005;1118} = 2 * 12322 / 1243 = 19,8$ minutos
- Limite Superior = $2T/\chi^2_{0,995;1116} = 2 * 12322 / 997 = 24,7$ minutos.

TABELA 9 – LIMITES DE CONFIANÇA À 99% PARA MTBF DOS POSTOS

POSTO	1	2	3	4	5	6	7
Tempo observado (min)	12322	47747	18633	36379	76395	63663	34725
Número de Paradas - r	558	445	554	550	169	425	879
MTBF (min)	22	107	34	66	452	150	40
inferior (min)	20	95	30	59	372	132	36
superior (min)	25	122	38	74	556	171	43

5.4. CÁLCULO DA CAPACIDADE DOS PULMÕES

Com base nos dados de entrada, foram calculadas as capacidades dos pulmões para a linha de produção do estudo de campo. A figura 16 mostra a entrada dos dados e a resolução pelo Solver.

Nota-se que as maiores capacidades de pulmão circundam exatamente o posto 3, que possui a menor parcela de indisponibilidade induzida permissível, ou seja, o posto gargalo da linha de produção. Comparado à situação atual (ver tab. 10), o modelo proposto manteve a mesma capacidade do pulmão entre os postos 3 e 4 e, 6 e 7. Reduziu drasticamente o pulmão entre os postos 1 e 2, passando de 11 para 1 e, finalmente, criou dois pulmões que não existiam antes, entre os postos 4, 5 e 6.

Considerando o custo das peças montadas ao longo do processo, uma análise preliminar sobre os custos dos pulmões evidenciou uma redução em torno de 32%, conforme mostrado na tabela 10. É chamada de análise preliminar visto que outros custos de estocagem de peças, tais como espaço físico, entre outros,

não foram considerados. Vale ressaltar que esta redução é considerando a capacidade máxima dos pulmões. Na prática, num sistema estável, os pulmões flutuam em torno de um valor médio devido as variações estocásticas do processo. Porém o percentual de redução também se manterá em torno deste valor.

FIGURA 16 – VALORES ENCONTRADOS DA CAPACIDADE DOS PULMÕES PARA O ESTUDO DE CAMPO

POSTO	1	2	3	4	5	6	7
Tempo de ciclo (min/peça)	1,65	1,74	1,81	1,59	1,38	1,34	1,20
Produção diária (peças)	226	226	226	226	226	226	226
Tempo Requerido (min)	470	470	470	470	470	470	470
Nível de Qualidade	99,50%	99,00%	99,00%	99,50%	99,50%	99,50%	99,50%
f Estado Produtivo Corrigido	0,80	0,85	0,88	0,77	0,67	0,65	0,58
MTBF (min)	22	108	34	66	452	150	40
MTTR (min)	2	5	3	7	12	4	1
Pa	0,92	0,95	0,90	0,90	0,97	0,97	0,97
Indisponibilidade Induzida	11,81%	10,78%	2,63%	13,21%	30,60%	32,54%	38,69%
Capacidade Sistemas	K12	K23	K34	K45	K56	K67	Total
Otimizado	1	4	6	1	1	1	14
Inteiro	1	4	6	1	1	1	14
Ajustado	1	4	7	1	1	1	15
Equilíbrio nos postos	Posto 1	Posto 2	Posto 3	Posto 4	Posto 5	Posto 6	Posto 7
Otimizado	3,06%	4,43%	2,63%	2,37%	9,68%	3,49%	1,99%
Inteiro	3,06%	4,18%	2,68%	2,46%	9,68%	3,49%	1,99%
Ajustado	3,06%	4,18%	2,27%	2,28%	9,68%	3,49%	1,99%

TABELA 10 – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS CUSTOS DOS PULMÕES

POSTO	K12	K23	K34	K45	K56	K67	Total (R\$)
Situação atual	11	7	7	0	0	1	26
Modelo proposto	1	4	7	1	1	1	15
Preço Unitário (R\$)	42,14	42,14	44,88	78,84	78,84	128,36	
Custo Pulmão Situação atual (R\$)	463,54	294,98	314,16	0,00	0,00	128,36	1201,04
Custo Pulmão Modelo (R\$)	42,14	168,56	314,16	78,84	78,84	128,36	810,90
Percentual de redução							32,5%

Com relação ao *lead-time*, considerando uma peça que entre na linha de produção no momento de saturação máxima da linha, ou seja, com os pulmões

completamente cheios, há uma redução de aproximadamente 36% no tempo de atravessamento da peça, conforme mostrado na tabela 11. Vale lembrar, assim como no cálculo dos custos que os pulmões na sua capacidade máxima é a condição mais crítica, porém esta não é a condição mais usual no sistema. O *lead-time* é determinado pela soma dos tempos nos pulmões mais a soma de tempo no processamento. O tempo no pulmão será em função do tempo de ciclo do posto subsequente ao pulmão. Portanto, para o pulmão K₁₂, o tempo será em função do tempo de ciclo do posto 2. Conforme tabela 3, o tempo no processamento é de 10,71 minutos. Calculando para situação atual, o *lead-time* seria estes 10,71 minutos mais 44,14 minutos de tempo nos pulmões. Outro fato a destacar, é a redução de 45% no tempo nos pulmões, conforme Tabela 11.

TABELA 11 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS *LEAD-TIMES* DOS PULMÕES

PULMÕES	K12	K23	K34	K45	K56	K67	Total Pulmão	Lead-time
Situação atual	11	7	7	0	0	1	26	
Modelo	1	4	7	1	1	1	15	
Tempo de ciclo (min/peça)	1,74	1,81	1,59	1,38	1,34	1,20		
Tempo nos Pulmões atual	19,14	12,67	11,13	0	0	1,20	44,14	54,85
Tempo nos Pulmões modelo	1,74	7,24	11,13	1,38	1,34	1,20	24,03	34,73
Percentual de redução							45,6%	36,7%

5.5 RESULTADOS

Após uma semana de aplicação da solução do modelo, os resultados encontrados na linha de produção equivalentes a jornada de trabalho ou 470 min, são mostrados na tabela 12. Durante o ensaio foram observados os seguintes pontos:

- a) Os tempos de manutenção autônoma e preparação de linha ocorreram dentro do previsto, somente os tempos de troca de ferramentas que foram 5% maior que o previsto, porém sem impacto no resultado de produção final;

- b) Os índices de qualidade permaneceram próximos do previsto;
- c) A diferença de produção entre os postos posteriores e anteriores ao gargalo é devido a diferença de peças que haviam nos pulmões conforme tabela 13;
- d) Todos os postos produziram conforme o ritmo do recurso-gargalo;
- e) No total de 25 min ao longo da semana o recurso-gargalo deixou de funcionar por indisponibilidade induzida;
- f) Não houveram falhas nos equipamentos;
- g) Há uma tendência do recurso-gargalo manter os pulmões anteriores cheios e os posteriores, vazios.

TABELA 12 – RESULTADOS OBTIDOS COM A APLICAÇÃO DO MODELO

POSTO	1	2	3	4	5	6	7
Produção diária (peças)	226,8	226,8	226,8	227,6	227,6	227,6	227,6
Nível de Qualidade	98,78%	99,80%	99,59%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

TABELA 13 – CONFIGURAÇÃO INICIAL E FINAL NA APLICAÇÃO DO MODELO

<u>Capacidade Pulmões</u>	<i>K12</i>	<i>K23</i>	<i>K34</i>	<i>K45</i>	<i>K56</i>	<i>K67</i>	<i>Total</i>
<i>Situação Inicial</i>	1	4	5	1	1	1	13
<i>Situação Final</i>	1	4	0	0	0	0	5

5.6 DISCUSSÃO

A Teoria das Restrições ou manufatura sincronizada vem se tornando um sistema válido no gerenciamento das operações industriais modernas. Através de suas idéias e métodos, empresas buscam reduzir seu estoque intermediário, alcançando ganhos substanciais com a melhoria da programação da produção.

O objetivo da teoria é identificar os seus recursos com restrição de capacidade e tomar decisões de como trabalhar com esta restrição para sincronizar o fluxo de produção. Esta restrição de capacidade pode ser operários, máquinas, demanda de mercado, políticas e leis que afetem a empresa. Segundo GOLDRATT e COX (1986), quando a restrição é um equipamento e este não é bem administrado, com uma programação bem detalhada para mantê-lo em funcionamento, o risco de haver perda de produção é alto. E, mesmo quando bem programado, qualquer interrupção no fluxo de produção que afete a restrição, pode reduzir a quantidade produzida ao final do dia. E, claramente as perdas de uma linha estão relacionadas a eficiência da mesma durante os períodos de saturação e desabastecimento dos seus postos (YAMASHITA, ALTIOK, 1998, p 886).

A solução encontrada para evitar este inconveniente seria a manufatura sincronizada com o sistema tambor-pulmão-corda. O tambor seria o ponto de controle no sistema de produção associado à restrição, ou seja, ditaria o ritmo da produção. Todos os outros equipamentos estariam subordinados a este. A corda seria a comunicação aos recursos anteriores à restrição informando que produzam somente a quantidade de peças que a restrição conseguiria consumir. Finalmente, o pulmão na manufatura sincronizada é a proteção do sistema contra as variações estocásticas dos tempos de processamento da própria restrição e do restante dos equipamentos. Entretanto, esta proteção deve ser controlada senão há risco do aumento do lead-time na produção.

Pesquisas no desenvolvimento de modelos analíticos para avaliação de performance de linhas de produção foram iniciadas na década de 70 (CHOI, LEE, 2001, p. 669). Entretanto, segundo RADOVILSKY (1998, p 114), poucos estudos estão sendo feitos para determinar o tamanho do pulmão, o qual é fundamental no sucesso da técnica tambor-pulmão-corda. Segundo este autor, estudos para definir

o tempo do pulmão são muito empíricos. Há alguns trabalhos (TATE, 1991; WEIN, 1991) para determinar com maior precisão o lead-time através de uma melhor estimativa dos tempos de espera em sistemas de filas, uma vez que este último é o principal componente no tempo do lead-time e função de carregamento do sistema (YÜCESAN, GROOTE, 2000, p. 118-130). Porém, o próprio GOLDRATT e FOX (1989), afirma que não é uma tarefa fácil calcular este pulmão. Estimam-se diferentes formas de resolver esta questão, isto é, dimensioná-lo igual ou metade do tempo do lead-time. Entretanto, SPENCER (1991, p. 22-27) afirma que não seria necessário calcular o tamanho do pulmão. Baseado na experiência e no processo, partiria com pulmões em diferentes pontos do fluxo e os ajustaria conforme a necessidade. Como a filosofia da TOC preconiza um processo de melhoria contínua, tais pulmões seriam reduzidos na medida em que fossem implantadas as melhorias. No entanto, conforme observado por RADOVILSKY (1998, p 114), se não for feita uma correta avaliação do tamanho necessário para o primeiro pulmão, o trabalho de redução de estoque pode durar até mesmo alguns meses, reforçando a necessidade de uma análise e cálculo mais precisos.

O estudo de RADOVILSKY (1998, p 114-118), assim como deste trabalho, foi desenvolver um sistema simples, porém de base científica, para que os gerentes pudessem determinar o tamanho dos pulmões sem passar pela sistema de tentativa-erro. Alguns estudos não consideram flutuações de tempo de produção antes dos recursos-gargalos, o que seria crítico para a teoria das restrições. O seu trabalho propõe a modelagem via um sistema de filas M/M/1/K, que utiliza tempo de chegada e serviço exponencial. Esta consideração é concordante com o resultado e estudos de diversos outros pesquisadores e reforça a decisão adotada no modelo deste trabalho. O seu modelo ainda levava em conta os custos dos pulmões versus o benefício de mantê-lo e estaria em função do lucro líquido, algo que este trabalho não considerou. Na visão moderna do TPM (NETO, 2001), os custos de armazenagem são considerados uma perda, contudo não integram a família das grandes perdas. As grandes perdas se relacionam diretamente com o equipamento, agindo sobre a sua disponibilidade e confiabilidade. O tamanho das filas está em função destes últimos, logo, são tratados indiretamente. Melhoria de confiabilidade e disponibilidade acabarão por reduzir o estoque entre os postos e o lead time, por consequência.

Esta dissertação se limitou às restrições físicas de capacidade, ou seja, ligadas ao fluxo de produção. São os conhecidos gargalos de produção, seja por falta de capacidade dos equipamentos, seja por baixa confiabilidade. Ignorar a confiabilidade do equipamento quando se modela um sistema resultaria numa superestimação da performance (CHOI, LEE, 2001, p. 667). Portanto, não foi o escopo do estudo, a demanda de mercado, políticas e leis. Tampouco a utilização dos indicadores operacionais de desempenho da teoria das restrições foi empregada, ou seja, o Ganho, a Despesa Operacional e o Inventário. O princípio da proteção do sistema por pulmões associada a filosofia SPE de redução de estoques serviram de base para o desenvolvimento do modelo. Este deveria ser simples e de fácil aplicação e, principalmente, haver coerência com os princípios destes sistemas.

O Sistema de Produção Enxuta, difundido por OHNO (1997), SHINGO (1996), WOMACK, JONES e ROOS (1992) reforça a importância de redução de estoque, buscando alcançar o estoque zero. A ferramenta de sincronização de processos seria o kanban que, de certa forma, representa um pulmão. Entretanto, este pulmão seria mais entre centros de produção do que propriamente postos de trabalho em linha. Somente quando este último for o centro de produção. Pelo cálculo da quantidade dos cartões kanban que é apresentado por diversos autores (GIANESI, CORRÊA, 1993, p. 95; TUBINO, 1999, p. 104) pode se notar esta aplicação. A equação foi construída para uma produção em pequenos lotes a fim de possibilitar o nivelamento da produção. Por isso, o tamanho do lote ser um dado de entrada na equação. O lote de transferência unitário poderia ser considerado na equação, porém dependendo da quantidade de peças a serem produzidas, haveria uma grande quantidade de cartões. Além disso, a equação não é tão enxuta no início, prevê um coeficiente de segurança contra as instabilidades do processo o qual deve ser reduzido à medida que as melhorias contínuas são implantadas. Portanto, a descrição da ferramenta kanban não teve o propósito de regular o fluxo de uma linha com lote de transferência unitário. Apesar destes autores não detalharem como são compensadas as diferenças de ritmo entre os postos, entretanto, fazem algumas considerações.

Por mais sincronizados que sejam os diversos postos que compõem a linha de produção, sempre haverá diferenças suficientes para gerar uma fila entre os mesmos, visto que equipamentos específicos ao posto podem falhar ou as peças

que são montadas podem apresentar algum tipo de problema de montagem ou qualidade, alterando por um espaço de tempo o ritmo do setor. Logo, o SPE admite um nível de estoque (pulmão) tolerável entre equipamentos de alta capacidade e baixa capacidade, a fim de manter estes últimos funcionando constantemente. Este pulmão tem um limite máximo onde a máquina de alta capacidade deve parar e recomeçar quando o pulmão voltar ao seu limite mínimo. Esta metodologia é conhecida como controle total (SHINGO, 1996, p. 138) e deve ser rigorosamente seguida. A mesma está profundamente relacionada com a primeira regra da teoria das restrições (GIANESI, CORRÊA, 1993, p. 146) de balancear o fluxo e não a capacidade.

Já o pulmão que tem a função de absorver desvios nas operações com maior influência do operário não era tolerado, apesar de não ser esclarecido desta forma por SHINGO (1996, p. 139). Segundo este autor, o trabalho em equipe seria a solução, com a intervenção de um operário reserva para regular o fluxo produtivo. Porém este princípio foi revisto nos últimos tempos. Toda operação possui desvio-padrão, os quais são maiores em operações manuais do que nas operações automatizadas. Portanto, a função do pulmão seria absorver tais desvios. Se por acaso um operador tivesse um problema momentâneo no seu posto de trabalho, ele poderia recuperar o tempo perdido aumentando o seu ritmo de trabalho, sem afetar os operadores a jusante e a montante. Este exemplo de aplicação é citado por GELDER (1994), onde a linha principal da fábrica Toyota de Kyushu teria sido dividida em onze mini-linhas, separadas por estoques intermediários. Quando um operário tivesse problema, ele e seus colegas de time da mesma mini-linha, teriam ao menos 10 minutos para resolvê-lo, antes que a próxima mini-linha fosse afetada. Alguns pulmões foram inseridos para flexibilizar mais ainda o sistema.

No trabalho desenvolvido por LUTZ, DAVIS e SUN (1998, p. 302) foi utilizada a simulação como ferramenta para o cálculo de pulmões em linhas balanceadas ou com gargalos, não sujeitas à falhas dos equipamentos e lote de transferência unitário. O objetivo do trabalho era encontrar a configuração de pulmões ao longo da linha que possibilitaria o maior ganho em termos de produção. A distribuição normal foi considerada para os tempos de processamento nos postos de trabalho.

Segundo estes autores, para este tipo de estrutura de linha, a recomendação da literatura de empregar pulmões entre os postos não deveria ser uma regra. Os pulmões deveriam ser alocados ao longo da linha a fim de maximizar o seu rendimento. Porém, nas simulações em linhas balanceadas, os maiores rendimentos de linha possuíam pulmões entre todos os postos. Isto confirma que a simplificação adotada de empregar um pulmão mínimo entre os postos no modelo deste trabalho permite melhorar o rendimento da linha. Esta consideração ainda foi confirmada por estudos com outros tipos de distribuição de probabilidade nos tempos de processamento, como de Erlang (PAPADOPOULOS, VIDALIS, 1999, p. 691-710; POWELL, HARRIS, 1999, p. 287). Estes últimos autores afirmam que problemas de linhas balanceados são bem conhecidos e que, apesar das flutuações do processo, o ganho é maximizado com a distribuição de quantidades idênticas entre todas os postos de trabalho.

Além deste resultado em linhas balanceadas, o trabalho de LUTZ, DAVIS e SUN (1998, p. 310-315) constataram o fenômeno da “tigela invertida” (POWELL; HARRIS, 1999, p. 287) no que diz respeito aos pulmões na linha. Maiores ganhos foram obtidos quando os pulmões no centro da linha possuíam maiores capacidades, significando que os postos das extremidades necessitam de menor proteção que aqueles ao centro. Em linhas balanceadas ou não, o modelo deste trabalho também apresenta a tendência a este fenômeno, uma vez que os postos da extremidade serem submetidos a apenas uma das condições de parada por indução, seja por bloqueio ou por desabastecimento. Isto se confirma observando a somatória da capacidade dos pulmões onde é menor quando os postos da extremidade da linha são gargalos.

Outra conclusão do trabalho de LUTZ, DAVIS e SUN (1998, p. 310-315) para as linhas que continham gargalos, ou seja, não balanceadas, seria que os maiores rendimentos foram alcançados exatamente quando os pulmões circundavam o gargalo. Para uma situação estudada foram levantadas mais de 250 mil possíveis configurações onde se confirmou a necessidade de um pulmão de maior capacidade anterior ao gargalo para protegê-lo de desabastecimento e o outro posterior para protegê-lo de bloqueio. Este resultado foi confirmado pelo estudo de outros autores (POWELL, PYKE, 1998; PAPADOPOULOS, VIDALIS, 1999, p. 691-710). O sistema de equações do modelo desta dissertação foi idêntico para todos os

postos, salvo os postos da extremidade. Os resultados obtidos durante os testes de funcionamento (item 4.4 deste trabalho) encontram a mesma configuração de maximização da produção destes autores. Como neste trabalho a produção era um item invariável, a maximização do ganho da produção se traduziu pela minimização dos pulmões. Desta forma, a linha de produção está protegida contra flutuações dos tempos de processamento pela quantidade mínima nos pulmões, sendo os maiores pulmões em ambos os lados do gargalo.

Outro trabalho não sujeito à falhas dos equipamentos, ou seja, os tempos de paradas das máquinas causadas por panes não foram considerados no modelo, uma vez que as quebras eram raras na linha, foi o estudo realizado por DUCLOS e SPENCER (1995, p. 178-185). O estudo variou os tempos de processamento das máquinas entre duas seções de uma linha de produção de uma fábrica entre 0 e 20%. Em termos de Teoria das Restrições, foi considerada toda a segunda seção como crítica e não apenas uma estação de trabalho para fins de análise.

Para fins de comparação, foi deslocado metade do tempo de estoque de peças acabadas na frente da operação gargalo e alterado a forma de programação da produção.

Os resultados mostraram que sem o pulmão de proteção, na medida em que se aumentou a variância no tempo de processamento da operação não gargalo, o estoque de peças acabadas reduziu-se na mesma proporção, chegando à zero. Isto ocorreu exatamente devido no ganho da operação gargalo provocado pela variação do tempo de ciclo da operação anterior. Já com o pulmão de proteção, o nível de estoque de produto acabado se manteve constante uma vez que a operação gargalo foi mantida operando. Entretanto, os autores não pesquisaram qual seria o tamanho exato do pulmão capaz de absorver a variação dos tempos de processamento estudada.

No modelo proposto por esta dissertação, esta variação do tempo de processamento foi descartada visto que a somatória dos tempos de processamento foi utilizada, o que está de acordo com POWELL (1994, p. 2201-2217), que afirma que a falta de balanceamento na média dos tempos possui efeitos piores do que na variação. Além disso, se calcular-se o desvio-padrão amostral pelos dados do Gráfico 1 e dividir-se pela média da amostra, é determinado o coeficiente de variação dos postos de trabalho, representado por σ/x (MIRSHAWKA, 1978, p. 231;

SILVA, 1999, p. 42). Neste caso o valor encontrado é menor que 0,2, o que pode ser considerado muito baixo, (POWELL; HARRIS, 1999, p. 287). Isto se confirma com o trabalho de HELBER (1998, p. 24-42), onde os tamanhos dos pulmões pouco variaram quando os tempos de processamento foram alterados de determinísticos para uma distribuição geométrica.

O ritmo de trabalho dos operários seria regulado pela própria observação dos pulmões onde não adiantaria acelerar o fluxo, pois causaria seu bloqueio e nem reduzir, que causaria desabastecimento no posto subsequente. Por isso, reforça a necessidade de haver ao menos uma peça entre os postos de trabalho. De qualquer forma, as variações dos tempos de processamento não consideradas no modelo, foram compensadas por uma maior variações nos tempos das trocas de ferramentas, preparação de linha e automanutenção que eram exponenciais. Estes são em função da quantidade de ciclos realizados e, portanto, também deveriam ser determinísticos. Porém, se somente os tempos das falhas propriamente ditas dos equipamentos fossem variassem, o modelo estaria simplificando muito a realidade.

LEVITIN e MEIZIN (2001, p. 77-79) desenvolveram também um modelo para minimizar os custos da produção dada uma confiabilidade requerida numa linha de produção com mais de um atendente. Em seu modelo também foi utilizado um sistema de filas com capacidade finita, onde seus tempos de falhas e reparo eram exponenciais. Assim como este trabalho, os autores empregaram algumas simplificações sobre o estado dos pulmões no momento das paradas. Entre elas, pode-se citar que a probabilidade de haver falhas simultâneas era muito pequena e por causa da variação da demanda, havia tempo suficiente para completar os pulmões quando descarregados. Tais considerações permitiram obter resultados demonstrando que sem a utilização de pulmões o custo da produção era maior. O modelo proposto deste trabalho considerou que o pulmão está vazio ou completo entre dois postos quando da parada, dependendo se o posto mais à frente na cadeia da linha possui menor ou maior tempo de ciclo comparado ao posto anterior. Esta consideração leva ao cálculo da probabilidade de ultrapassar o tempo médio de parada que, pela distribuição exponencial, estaria em torno de 37% (PRADO, 1999, p. 52). Um pouco menos conservativo do que o trabalho de CONWAY et al. (1988, p. 1183-1196) que recomendaram que a capacidade dos pulmões fosse

suficiente para assegurar metade da produção durante o tempo de parada, em linhas de produção com um atendente, como este trabalho.

O emprego da lei exponencial em linhas sujeitas à falhas também é efetuada mesmo quando se aplica algoritmos. CHOI e LEE (2001, p. 667-684) desenvolveram estudos de cálculo da capacidade de pulmões por cadeia de Markov a tempo contínuo. Dois algoritmos para encontrar a solução ótima do sistema empregavam avaliação simples e exata de equações lineares. Ambos os algoritmos foram ferramentas efetivas na medição de performances quando fórmulas ou equações gerais não podem ser determinadas.

CHOI e LEE (2001, p. 668) reforçam a importância de levar em consideração todos os tipos de paradas do posto de trabalho, tais como, mudanças no tipo e no volume, troca de ferramentas, matéria-prima, insumos, entre outros. Este problema inerente é vital quando afetar a verdadeira capacidade do sistema (STOOP, WIERS, 1996, p. 37-53). Por isso, este modelo buscou considerar toda a parada que pudesse interromper o fluxo contínuo na linha de produção. Este fato pode ser uma limitação da aplicação do modelo, uma vez que só poderá ser aplicado se o usuário conhecer todas as interrupções do seu fluxo. Uma forma de compensar esta falta de dado, seria estimar tais paradas, como aconteceria se uma nova linha de produção fosse projetada.

Os resultados obtidos neste trabalho estão coerentes com os princípios da teoria das restrições e da produção enxuta. Conseguiu-se reduzir o lead-time e os custos intermediários sem afetar a produção.

Além disso, o modelo proposto apresenta coerência com os resultados na literatura, principalmente se comparar a complexidade das ferramentas utilizadas na resolução. Trabalhos com simulação conseguem mais informações do que um modelo analítico. É fácil de alterar e estender. Porém, a limitação da simulação é o custo do desenvolvimento do modelo (CHOI, LEE, 2001, p. 669), além do conhecimento dos usuários do software e custo do próprio software. Por isso, a importância de desenvolver uma ferramenta simples, baseada numa planilha eletrônica onde seu software é largamente difundido.

Ao observar os resultados do estudo de campo, o posto que possuía o maior risco de impedir a produção diária desejada, foi protegido com os maiores pulmões. Além do maior tempo de ciclo, possuía uma baixa probabilidade de

disponibilidade. Este resultado está coerente com a literatura e já havia sido observado durante os teste de funcionamento da ferramenta (item 4.4). Observa-se pelos testes que os recursos com restrição de capacidade são sempre protegidos pelos pulmões. Importante ressaltar que todas as condições previstas neste modelo requerem uma estabilidade. Quando os dados de entrada são estáveis, os resultados e saídas dos modelos poderão ser controlados (LIU, YUAN, 2001, p. 602).

Pelos resultados obtidos, constata-se a aplicação da teoria das restrições no dia-a-dia do chão de fábrica das empresas. Pode-se ilustrar a sua eficiência na redução dos estoques e sua busca em maximizar o ganho. Além disso, verifica-se a teoria das filas como uma técnica alternativa de modelagem, baseada neste contexto.

O excesso de abstração causa falta de informação no modelo e ocasiona sua baixa performance e, por outro lado, excesso de informação, para um modelo analítico, pode aumentar as dificuldades em obter as equações necessárias para resolução (CHOI, LEE, 2001, p. 669). No entanto, as simplificações adotadas neste modelo buscaram distanciar o mínimo possível da realidade de uma linha de produção ao sistema de equações do próprio modelo. Diversas outras considerações poderiam ter sido feitas e outras distribuições de probabilidade terem sido adotadas, o qual modificaria o sistema de equações. Porém, o resultado final talvez não fosse muito modificado em sua essência. Por isso, o trabalho da ciência está em constante movimento a fim de testar, comprovar e rejeitar hipóteses, modelos, teorias e leis.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

Neste estudo buscou-se desenvolver um modelo numérico probabilístico para determinar a capacidade dos pulmões entre postos numa linha de produção dedicada com lote de transferência unitário, bem como, analisar a sua coerência com os princípios das filosofias que serviram de base para sua concepção. A opção pelo modelo probabilístico foi em função de desenvolver um sistema de equações no qual pudesse ser aplicado um método numérico para sua resolução, sendo este último de algum usual *software* de planilha eletrônica.

Inicialmente, foi apresentada uma descrição da evolução dos sistemas de produção, o método da teoria das restrições para gestão da produção e o estudo da confiabilidade dos equipamentos. O surgimento e o funcionamento da linha de produção fordista, com o seu sistema de abundância, produção empurrada, altos estoques, entre outros, permite entender alguns princípios antagônicos na filosofia da produção enxuta, notadamente reconhecida pela sua eficácia na redução de custos de produção. Além disso, cada vez mais a competitividade do mercado demanda a adoção de uma filosofia nos sistemas de produção das empresas. É claramente no modo de organizar, controlar e aperfeiçoar os processos que as mesmas tornam-se capazes de se flexibilizarem para atender a demanda dos atuais e futuros novos clientes.

A ascensão do sistema Just-in-time demonstrou ao mundo a necessidade de se reduzir custos, e uma das formas era a redução de estoques. Porém, a produção enxuta não poderia ser aplicada em sua plenitude em todos os sistemas de produção. Deste modo, esta lacuna proporcionou o nascimento de novas técnicas para reduzir custos. Dentre elas, pode-se destacar a teoria das restrições que se preocupou especialmente com estoques no fluxo de produção. A sua idéia

principal é maximizar o ganho com o estoque intermediário suficiente para não parar o fluxo de produção. Por isso, todo o fluxo de produção deveria estar subordinado as operações potenciais em impedir que isto acontecesse, ou seja, os gargalos de produção.

Os gargalos de produção podem ser causados por dois tipos diferentes de eventos: pelo tipo de processamento, que devido a sua complexidade poderia requerer um tempo maior, ou pela sua confiabilidade, máquinas ou equipamentos que constantemente entram em falhas. Para isso, a necessidade de se conhecer as técnicas que administram estas paradas, como por exemplo, a manutenção produtiva total.

No terceiro capítulo, foi apresentada a modelagem de sistemas através da teoria das filas. Primeiramente, fez-se uma definição dos conceitos básicos de sistemas e modelos, inclusive com os tipos de modelos existentes. Foi então apresentada a teoria das filas com os tipos de sistemas que foram utilizados neste trabalho, ou seja, sistemas D/D/1/K-1 e M/M/1, e as suas equações de cálculo de probabilidades. A utilização de tempos de processamento determinísticos pode ser considerada como uma nova limitação deste modelo,

No quarto capítulo, foi delimitado o tipo de linha de produção que seria modelado. As simplificações ou abstrações do sistema foram apresentadas e limitam a aplicação deste modelo. Assim sendo, a partir da teoria das filas e considerações sobre o sistema, foram determinadas as equações de cada posto de trabalho em função da capacidade dos pulmões entre os postos de trabalho. O modelo considera diferenças de tempo de ciclo entre os postos e a confiabilidade dos mesmos e por isso, requer diversos dados de entrada, como os modelos de simulação. Em seguida, foi apresentada a construção da planilha eletrônica, num *software* largamente difundido entre as empresas, cujo método numérico de uma ferramenta de análise de dados encontra a solução ótima. Configurações da ferramenta são apresentadas no intuito de convergir mais rapidamente à solução ótima. Diversas simulações variando os dados de tempo de ciclo e confiabilidade dos postos foram efetuadas a fim de verificar o comportamento do modelo. Pelos resultados alcançados, pode-se concluir que o modelo busca proteger o gargalo do

sistema com pulmões de maior capacidade, seja por uma limitação de tempo de ciclo, seja por uma limitação de confiabilidade do equipamento.

No capítulo seguinte foi realizado um estudo de campo onde houve a possibilidade de aplicar o modelo desenvolvido. A empresa estudada era do setor automotivo que já trabalhava dentro do contexto de produção enxuta, porém buscava melhorar mais ainda o seu desempenho.

Os resultados iniciais apresentaram uma redução de aproximadamente 30% no custo do estoque intermediário, isto é, dos pulmões na linha de produção. O mesmo valor aproximado foi encontrado para redução do *lead-time* de fabricação.

Os resultados obtidos durante o funcionamento da linha de produção configurada pelo modelo cujo ensaio se deu ao longo de uma semana, apresentaram valores próximos ao calculado. Com isso, pode-se concluir que o modelo se aplica para esta linha de produção.

Desta forma, constatou-se as grandes vantagens que pode advir para a empresa a adoção da filosofia de teoria das restrições no processo produtivo. Além disso, comprovou a eficácia da teoria das filas em modelagem de sistemas.

Finalmente, os objetivos deste trabalho foram alcançados na medida que o estudo ilustrou a sua aplicação através de um estudo de campo, a qual visava otimizar a performance de uma linha de produção. O intuito de desenvolver uma ferramenta de fácil aprendizagem e baixíssimo custo, também foram alcançados.

6.2 RECOMENDAÇÕES

De acordo com o trabalho desenvolvido e os resultados obtidos no estudo de campo, surgem recomendações para os trabalhos futuros que sigam o mesmo tipo de pesquisa:

- a) Comparar os resultados deste modelo com resultados de modelos de simulação, baseando-se nos mesmos dados de entrada;

- b) Aprofundar a pesquisa para configurações diferentes daquela empregada neste sistema, tais como, lote de transferência maiores que um, considerar bloqueio e desabastecimento nos postos de extremidade de linha, entre outros;
- c) Desenvolver um sistema de equações para fluxos de produção ramificados;
- d) Utilizar a ferramenta para planejamento de fluxos produtivos;
- e) Analisar a sua aplicação como ferramenta de melhoria contínua junto a grupos de melhoria contínua;
- f) Ampliar o estudo para outros setores da empresa que não sejam diretamente relacionados com fluxos de produção, porém apresentem um sistema de filas em seu funcionamento, tais como financeiro, vendas, logística, entre outros;
- g) Adequar a mesma metodologia de análise para modelos com tempos de processamento não determinísticos, isto é, com distribuições de probabilidade especiais, tais como, normal, erlang-m, geométrica, hiper-exponencial, entre outras.
- h) Utilizar um outro *software* para cálculo da solução ótima;
- i) Uma continuidade deste trabalho seria a sua adequação para um mix de produtos na linha de produção.
- j) Finalmente, avaliar o impacto desta ferramenta num sistema de produção cujas práticas não sejam condizentes com aquelas da produção enxuta.

GLOSSÁRIO

Andon	Dispositivos sinalizadores
Autonomação	Controle autônomo de defeitos
Default	Configuração básica
Feedback	Retorno da informação ao emissor num sistema de comunicação
Gargalo	Limitações do sistema produtivo
Kaizen	Melhoramento contínuo
Kanban	Sistema puxado de programação e acompanhamento da produção
Layout	Arranjo-físico das instalações industriais
Lead time	Tempo de passagem ou atravessamento
Lean Production	Produção Enxuta
LIFO	Último a chegar, último a sair (<i>Last In First Out</i>)
Mix	Variedades
Output	Produção
Poka-yoke	Dispositivos à prova de erros
Pulmão	Estoque de proteção
Setup	Tempo de preparação e ajuste das máquinas antes de iniciar a produção.
Software	Programa de computador
Team Leader	Líder de equipe.
Throughput	Ganho

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, S.C. MRP, JIT, OPT, FMS? Making sense of production operation systems. **Harvard Business Review**, p. 8-16, 1985.

AGGARWAL, S.C.; AGGARWAL, S. The management of manufacturing operations: An appraisal of recent developments. **International Journal Operations Productions et Management**, p. 21-38, 1985.

ANTUNES JUNIOR, J.A.V.; RODRIGUES, L.H. **Teoria das Restrições**: uma análise das ações de melhorias necessárias para levantar a capacidade das restrições, UFRGS, 1997.

ANTUNES JUNIOR, J.A.V. **Manutenção Produtiva Total**: Uma análise crítica a partir de sua inserção no Sistema Toyota de Produção. Disponível em: <http://www.iautomotivo.com> Acesso em: 16 dez. 2001.

BERGAMO FILHO, V. **Confiabilidade Básica e Prática**. São Paulo: E. Blücher, 1997.

BLACK, J.T. **O projeto da fábrica com futuro**. Porto Alegre: Bookman, 1998.

CARRION, R.M. Reestruturação produtiva, organização e gestão do trabalho na indústria petroquímica: estudo no complexo petroquímico do Rio Grande do Sul. In: V Encontro Nacional, Associação Brasileira de Estudos do Trabalho, PPGA / UFRGS p. 554-582. Porto Alegre, **Anais Eletrônicos**. Disponível em: <http://www.google.com.br> Acesso em: 15 ago. 2002.

CERVO, A.L., BERVIAN, P.A. **Metodología Científica**. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1981.

CHAKRAVARTI, LAHA, ROY. **Handbook of Methods of Applied Statistics**. Ed. J. Wiley and Sons, Volume I, p. 392-394, 1967.

CHECOLI, P. F.; MONTEIRO, A.V. **A Teoria das Restrições como recurso para a excelência da gestão da manufatura**, UFSC, 2000.

CHOI, S.H.; LEE, J.S.L. Computational algorithms for modeling unreliable manufacturing systems based on Markovian property. **European Journal of Operational Research/ Elsevier**, n. 133, p 667-684, 2001.

CORRÊA, H.L.; GIANESI, I.G.N. **Just-in-time, MRP II e OPT**: Um enfoque estratégico. São Paulo: Atlas, 1993.

CORDON, C. Quality defaults and work-in-process inventory. **European Journal of Operational management**, n. 3, p. 276-295, 1995.

CONWAY, R.W., MAXWELL, W.L., McCLAIN, J.O., THOMAS, L.J. The role of week-in-process inventories in serial production lines. **Operations Research**, n. 8, p. 1183-1196, 1988.

DUCLOS, L.; SPENCER, M. The impact of a constraint buffer in a flow shop. **International Journal of Production Economics/ Elsevier**, n. 42, p 175-185, 1995.

FACHIN, O. **Fundamentos de Metodologia**. São Paulo: Atlas, 1993.

FLEURY, A.; VARGAS, N. **Aspectos Conceituais**: em Organização do Trabalho. São Paulo: Atlas, 1988. p. 17-37.

GELDER, J.W. van, **Lean Production is on the way out again in Japan**. Paper, Constrast Advies, 1994. Disponível em : <http://www.xs4all.nl/~constrast/english/kyushu.html>. Acesso em: 16 ago. 2002.

GITAHY, L.; RABELO, F.; LEITE, M. **Estudo da Competitividade da Indústria Brasileira - Relações de Trabalho, Política de Recursos Humanos e Competitividade**: Reestruturação Produtiva e a Empresa, IE/UNICAMP - IEI/UFRJ – FUNCEX – FDC, Campinas, 1993.

GOLDRATT, E.M.; COX, J.F. **A Meta**. São Paulo: IMAM, 1986.

GOLDRATT, E.; FOX, R. **A Corrida pela Vantagem Competitiva**. São Paulo: Educator, 1989.

GOLDRATT, E. **A síndrome do palheiro**: garimpendo informação num oceano de dados. São Paulo: Educator, 1991.

GRAÇA, L. **Volvismo, Fordismo e Toyotismo**: O caso da fábrica de automóveis da Volvo em Uddevalla. 3º parte, Textos sobre saúde e trabalho, 2000.

GROSS, D.; HARRIS, C. **Fundamentals of Queuing Theory**. Washington, DC: J. Wiley & Sons, 1974.

GRUNWALD, H.; STRIEKWOLD, P.E.T.; WEEDA, P.J. A framework for quantitative comparison of production concepts. **International Journal Production Research**, p. 281-292, 1989.

HELBERT, S. Decomposition of unreliable assembly/disassembly networks with limited buffer capacity and random processing times. **European Journal of Operational Research / Elsevier**, n. 109, p 24-42, 1998.

IBM, **Microsoft Excell 7.0 - Nível 3**: Análise de Planilhas. IBM Express PC Training, 1998. Material de treinamento.

INFERÊNCIA Consultoria e Sistemas LTDA. **Excell Avançado**. 1997. Material de treinamento.

KOVACS, I.; FERREIRA, J.M.C.; SANTOS, M.J.; **Mudança Tecnológica e Organizacional**: Análise de Tendências na Indústria. nº 2, 1994. Socius Working Papers, Centro de Investigação em Sociologia Econômica e das Organizações, Instituto Superior de Economia e Gestão, Universidade Técnica de Lisboa.

KUMPERA, V. **Interpretação Sistêmica do Planejamento**. São Paulo: Nobel, 1979.

JIPM. **TPM Instructors Course**, 3ª ed. 1999. Apostila de treinamento de instrutores de TPM.

LAKATOS, E.M., MARCONI, M.A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 3ª ed., São Paulo: Atlas, 1991.

LAKATOS, E.M., MARCONI, M.A. **Metodologia do Trabalho Científico**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 1992.

LEVITIN, G.; MEIZIN, L. Structure optimization for continuous production systems with buffers under reliability constraints. **International Journal of Production Economics / Elsevier**, n.70, p 77-87, 2001.

LIU, L., YUAN, X.M. Throughput, flow times, and service level in an unreliable assembly system. **European Journal of Operational Research / Elsevier**, n. 135, p. 602-615, 2001.

LUBBEN, R. **Just-in-time**: Uma estratégia avançada de produção. São Paulo: McGraw-Hill, 1989.

LUTZ, C.M.; DAVIS, K.R.; SUN, M. Determining buffer location and size in production lines using tabu search. **European Journal of Operational Research / Elsevier**, n. 106, p. 301-316, 1998

MARX, R. Processo de Trabalho e Grupos Semi-Autônomos: a evolução da experiência sueca de Kalmar aos anos 90. **Revista de Administração de Empresas/ EAESP/FGV**, São Paulo, v.2, n. 32, p. 36-43, Abr./Jun. 1992.

MENDES, A.L. **Gestão do Valor nas operações de Manutenção**. Florianópolis, 2002. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina.

MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Office 2000 Premium**: excell 2000. NY, 1998.

MIRSHAWKA, V. **Probabilidade e Estatística para Engenharia**. São Paulo: Nobel, 1978.

MIRSHAWKA, V.; OLMEDO, N.L. **Manutenção: Combate aos Custos da Não Eficácia**: A vez do Brasil. São Paulo: M. Books, 1993.

MOLINA, J.F.G. **Contribuição da Informatização no Sistema Kanban**: Critérios e exemplos de implementação. Florianópolis, 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina.

MONDEN, Y. **Sistema Toyota de Produção**. São Paulo: IMAM, 1984.

MOREIRA, D. A., **Dissertação 5.htm**. Fundação Escola de Comércio Álvares Penteado. [s.l.], 26 abril 2001. Internet Explorer 3.0.

MOURA, R. **Flexibilidade Total**: Homem x Máquina. São Paulo: IMAM, 1987.

NAKAJIMA, S. **Introdução ao TPM**: Total Productive Maintenance. Tradução: Mário Nishimura. São Paulo: IMC Internacional Sistemas Educativos LTDA, 1989.

NETO, A.J.F. **Gestão Inovadora das Perdas**. 2001. Material do Seminário TPM para formação de instrutores pela JIPM.

OHNO, T. **O Sistema Toyota de Produção**: além da produção em larga escala. Porto Alegre: Artes Médicas, 1997.

PAPADOPOULOS, H.T.; VIDALIS, M.I. Optimal buffer allocation in short μ -balanced unreliable production lines. **Computers & Industrial Engineering / Pergamon**, n. 37, p. 691-710, 1999.

PINTO, A.K.; XAVIER, J.N. **Manutenção**: Função Estratégica. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1998.

POWELL, S. Buffer allocation in unbalanced three-station serial lines with bottlenecks. **International Journal of Production Research**, n. 32, p.2201-2217, 1994.

POWELL, S.; HARRIS, J. An algorithm for optimal buffer placement in reliable serial lines. **Institute of Industrial Engineers**, v31, i4, p. 287, Abril 1999.

POWELL, S.; PYKE, D. Buffering unbalanced assembly systems. **Institute of Industrial Engineers**, v30, n1, p. 55 (11), Janeiro 1998.

PRADO, D. **Teoria das Filas e da Simulação**. Belo Horizonte: Desenvolvimento Gerencial, 1999.

PRADO, C.A.S., CAULLIRAUX, H.M., **Uma proposta de trajetória de implantação de uma estrutura de sincronização da produção com base na Teoria das Restrições: o caso têxtil**. COPPE/UFRJ, 2000.

PTAK, C.A. MRP, MRP II, OPT, JIT and CIM – Succession, evolution, of necessary combination. **Production Inventory Management Journal**, 1991. p. 7-11.

RADOVILSKY, Z. A quantitative approach to estimate size of the time buffer in the theory of constraints. **International Journal of Production Economics /Elsevier**, n. 55, p. 113-119, 1998.

ROSS, S.M. **Introduction to Probability Models**. 6th ed. USA: Academic Press, 1997.

SCHIMDT, J.W.; TAYLOR, R.E. **Simulation and analysis of Industrial Systems**. Irwin: Homewood Hill, 1970.

SHAPIRO, S.S., WILK, M.B. **An analysis of variance test for normality (complete samples)**. *Biometrika*, p. 591-611, 52, 3 e 4, 1965.

SHAMBLIN, J.E.; STEVENS JUNIOR, G.T. **Pesquisa Operacional: Uma abordagem básica**. São Paulo: Atlas, 1979.

SHANNON, R.E., **Systems simulation: the art and science**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975.

SHINGO, O. **O Sistema Toyota de Produção do ponto de vista da Engenharia de Produção**. 2^a ed. Porto Alegre: Artes Médicas, 1996.

SHOOK, J.Y. **Bringing the Toyota Production System to the United States**, p. 41-69, 1995.

SILVA, P.A.L. **Probabilidade e Estatística**. Rio de Janeiro: Reichmann & Affonso Editores, 1999.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R.; **Administração da Produção**. Tradução de: Brandão, A., Straube, C.; Corrêa, H., Corrêa, S.; Giancesi, I., Edição Compacta. São Paulo: Atlas, 1999.

SMITH, J.J. **Theory of Constraints and MRP II: from theory to results**. Bradley University, Peoria Illinois, 1994.

SOARES, C.R.D. **TOC, STP e TQC: uma abordagem conjunta**. UFRGS, Porto Alegre, 1997.

SOARES, L.F.G. **Modelagem e Simulação Discreta de Sistemas**. IME-USP, São Paulo, 1990.

SPEAR, S. BOWEN, H.K. Decoding the DNA of the Toyota Production System. **Harvard Business Review**, Set./Out. 1999.

SPENCER, M. Using The Goal in an MRP. **Production and Inventory Management Journal**, p. 22-27, 1991.

SPIEGEL, M.R. **Probabilidade e Estatística**. Tradução de Alfredo Alves de Faria, São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978.

STOOP, P.P.M., WIERS, V.C.S. The complexity of scheduling in practice. **International Journal of Operations and Production Management**, v.16, n. 10, p. 37-53, 1996.

STRACK, J. **GPSS: Modelagem e Simulação de Sistemas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984.

TAVARES, L. A., **Excelência na Manutenção - Estratégias, Otimização e Gerenciamento**. Salvador: Casa da Qualidade Editora Ltda., 1996.

TUBINO, D.F. **Sistemas de Produção: a produtividade no chão de fábrica**. Porto Alegre: Bookman, 1999.

YAMASHITA, H.; ALTIOK, T. Buffer capacity allocation for a desired throughput in production lines. **Institute of Industrial Engineers**, v30, i10, p. 883, Out. 1998.

YÜCESAN, E.; GROOTE, X. de. Lead times, order release mechanisms and customer service. **European Journal of Operational Research / Elsevier**, n. 120, p. 118-130, 2000.

WEBSITE 1. Disponível em: <http://www.reciclando-ideias.2x.com.br/tipKb.htm>. Acesso em: 15 de agosto de 2002.

WEBSITE 2. Disponível em: www.produttore.com.br/st-point.htm. Acesso em: 21 de agosto de 2002.

WYREBSKI, J. **Manutenção Produtiva Total - Um modelo adaptado**. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 1997.

WOMACK, J.P.; JONES, D.T. **A Mentalidade Enxuta nas Empresas: Eliminação do Desperdício e Criação de Riqueza**. Rio de Janeiro: Campus, 1998.

WOMACK, J.P.; JONES, D.T.; ROOS, D. **A Máquina que Mudou o Mundo**, 10ª Ed. Rio de Janeiro: Campus, 1992.

WOOD Jr., T. Fordismo, Toyotismo e Volvismo: Os Caminhos da Indústria em Busca do Tempo Perdido. **Revista de Administração de Empresas/ EAESP/FGV**, São Paulo, 32(4), p.6-18, Set./Out. 1992.